

В

ДЛЯ ВУЗОВ

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Под общей редакцией
д-ра техн. наук проф. А.М. МИХАЙЛОВА

Допущено Министерством высшего и среднего
специального образования СССР в качестве
учебника для студентов металлургических
специальностей вузов



МОСКВА
«МАШИНОСТРОЕНИЕ»
1987

ББК 34.61
Л64
УДК 621.74 (075.8)

*А. М. Михайлов, Б. В. Бауман, Б. Н. Благов, Н. Т. Исаханян,
Г. И. Клецкин, Я. Г. Клецкин, Л. Я. Козлов, И. Б. Куманин,
А. В. Курдюмов, Л. И. Леви, М. В. Пикунцов, В. П. Соловьев,
Э. Б. Тен, Я. И. Шкленник*

Рецензент кафедры «Литейное производство» Уральского
политехнического института им. С. М. Кирова

**Литейное производство: Учебник для металлургических
Л64 специальностей вузов. — 2-е изд., перераб. и доп. — М.:
Машиностроение, 1987. — 256 с., ил.**

(В пер.): 95 к.

Изложены основы теории литейных процессов, основы технологии изготовления отливок и особенности их производства из чугуна, стали и сплавов цветных металлов. Рассмотрено производство отливок различными способами.

Второе издание (1-е изд. 1971 г.) дополнено сведениями о новых способах получения отливок и процессах структурообразования ряда литейных сплавов.

Л $\frac{2704020000-048}{038 (01)-87}$ 48-87

ББК 34.61
6П4.1

УЧЕБНИК

**Анатолий Михайлович Михайлов, Борис Викторович Бауман,
Борис Николаевич Благов и др.**

ЛИТЕЙНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Редактор *О. И. Скворцова*
Технический редактор *Н. М. Харитонова*
Корректоры *О. Е. Мишина* и *Л. Е. Соношкина*
ИБ № 4736

Сдано в набор 19.06.86. Подписано в печать 18.09.86. Т-05778.
Формат 60×90^{1/16}. Бумага типографская № 1. Гарнитура литературная.
Печать высокая. Усл. печ. л. 16,0. Усл. кр.-отг. 16,0. Уч.-изд. л. 19,27.
Тираж 18500 экз. Заказ 167. Цена 95 к.

Ордена Трудового Красного Знамени издательство «Машиностроение»,
107076, Москва, Стромынский пер., 4.

Ленинградская типография № 6 ордена Трудового Красного Знамени
Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой
Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР
по делам издательств, полиграфии и книжной торговли.
193144, г. Ленинград, ул. Моисеенко, 10.

© Издательство «Машиностроение», 1987 г.

В машино- и приборостроении, строительстве и других отраслях народного хозяйства различные металлические изделия и заготовки получают обработкой давлением в горячем или холодном состоянии (пластической деформацией), резанием, прессованием порошков с последующим спеканием, сваркой и литьем.

Сущность получения отливок заключается в том, что расплавленный и перегретый сплав заданного состава заливается в литейную форму, внутренняя полость которой с максимальной степенью приближения воспроизводит конфигурацию и размеры будущего изделия. При охлаждении металл затвердевает и в твердом состоянии сохраняет очертания той полости, в которую он был залит. Большая часть существующих технологий обработки металлов включает стадию получения литой заготовки (слитка). Из этого следует, что наиболее эффективной является литейная технология, позволяющая получать изделия необходимых конфигурации, размеров и свойств непосредственно из расплава при минимальных затратах энергии, материалов и труда.

Перспективность литейной технологии обуславливается также универсальностью, позволяющей получать изделия из сплавов практически любого состава, в том числе из труднодеформируемых, массой от нескольких граммов до сотен тонн, с размерами до десятков метров.

Теория и практика литейного производства на современном этапе позволяет получать изделия с высокими служебными свойствами. Свидетельством тому является надежная работа отливок в реактивных двигателях, атомных энергетических установках, других машинах и установках ответственного назначения. В настоящее время в мире объем фасонных отливок из всех сплавов составляет 75—80 млн. т. СССР занимает ведущее место по производству отливок. В последние годы объем производства по массе стабилизировался. Основная тенденция развития заключается в росте качества отливок, повышении точности их размеров, снижении металлоемкости. Все это вместе взятое обеспечивает рост количества выпускаемых отливок.

Литейная технология может быть реализована различными способами. Последовательность технологического процесса получения

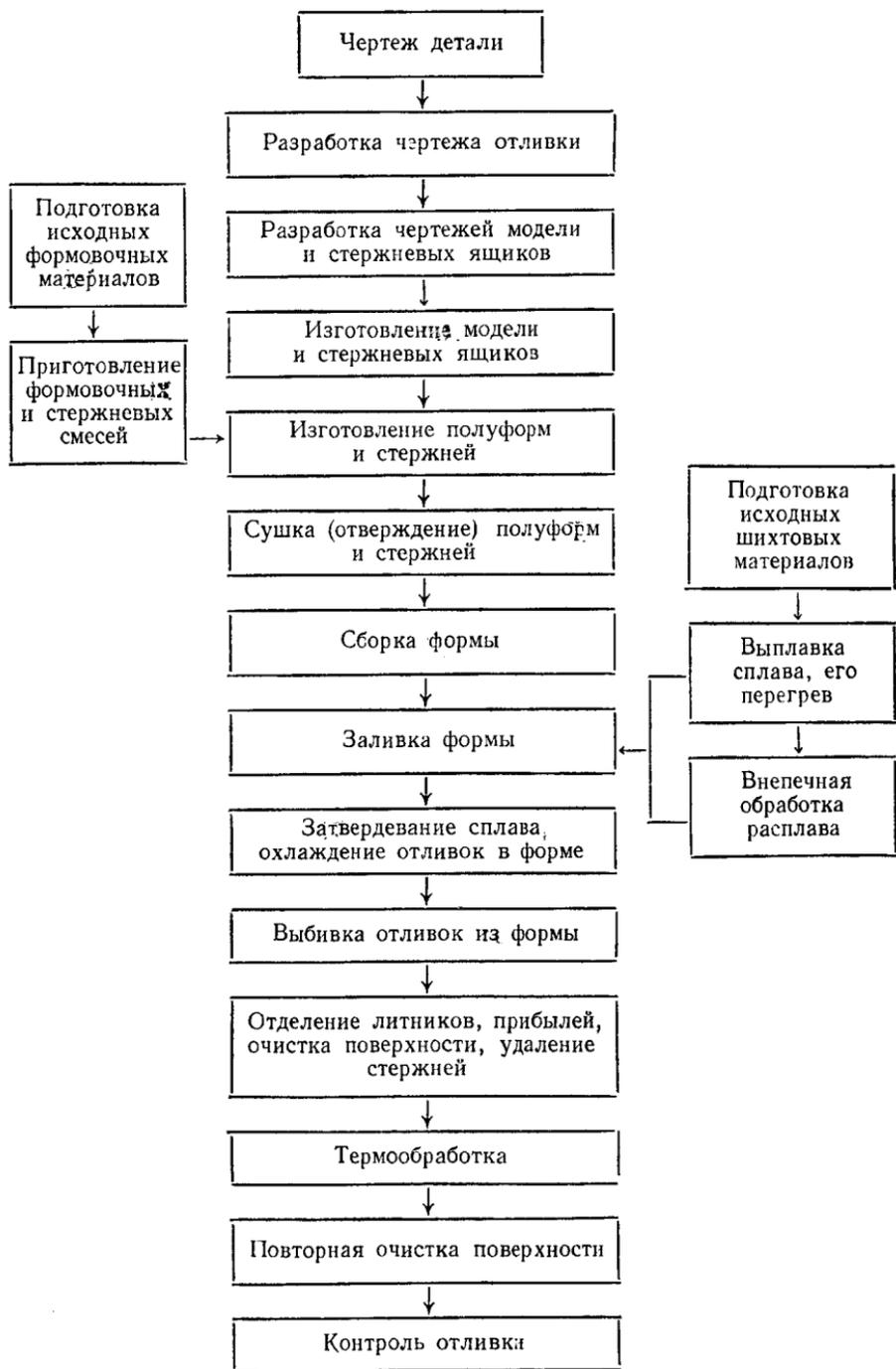


Рис. 1. Технологический процесс получения отливок в разовой песчаной форме

отливок в разовой песчаной форме приведена на рис. 1. Весь цикл изготовления отливки состоит из ряда основных и вспомогательных операций, осуществляемых как параллельно, так и последовательно в различных отделениях литейного цеха. Модели, стержневые ящики и другую оснастку изготавливают, как правило, в модельных цехах.

Литейная разовая песчаная форма (рис. 2) в большинстве случаев состоит из двух полуформ: верхней 4 и нижней 3, которые получают уплотнением формовочной смеси вокруг соответствующих частей (верхней и нижней) деревянной или металлической модели в специальных металлических рамках — опоках 5. Модель отличается от отливки размерами, наличием формовочных уклонов, облегчающих извлечение модели из формы, и знаковых частей 7, предназначенных для установки стержня 10, образующего внутреннюю полость (отверстие) в отливке. Стержень изготовляют из смеси, например песка, отдельные зерна которого скрепляются при сушке или химическом отверждении специальными крепителями (связующими). В верхней полуформе с помощью соответствующих моделей выполняется воронка и система каналов 1, по которым из ковша поступает литейный сплав в полость формы 2, и дополнительные полости — прибыли 6.

После уплотнения смеси модели собственно отливки, литниковой системы и прибылей извлекают из полуформ. Затем в нижнюю полуформу 3 устанавливают стержень 10 и накрывают верхней полуформой. Необходимая точность соединения обеспечивается штырями 8 и втулками 9 в опоках. Перед заливкой сплава во избежание поднятия верхней полуформы жидким расплавом опоки скрепляют друг с другом специальными скобами или на верхнюю опоку устанавливают груз.

В разовых песчаных формах производят ~80 % всего объема выпуска отливок. Однако точность и чистота их поверхности, условия труда, технико-экономические показатели не всегда удовлетворяют требованиям современного производства.

В связи с этим все более широкое применение находят специальные способы литья: по выплавляемым (выжигаемым) моделям,

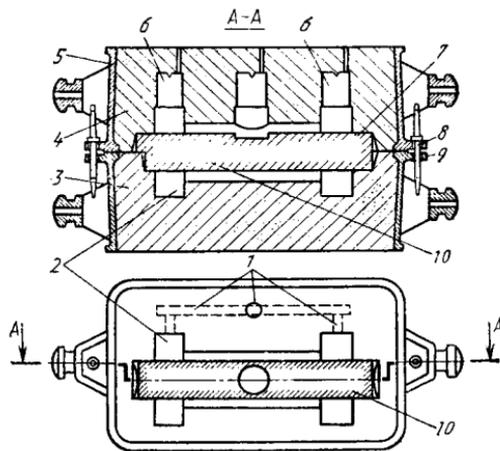


Рис. 2. Литейная разовая песчаная форма:

1 — литниковая система; 2 — полость формы; 3 — нижняя полуформа; 4 — верхняя полуформа; 5 — опока; 6 — прибыли; 7 — знаковая часть стержня; 8 — штырь; 9 — втулка; 10 — стержень

в металлические формы, под давлением, центробежным способом, вакуумным всасыванием, намораживанием и т. д. Отливки различных размеров, сложности и назначения из сплавов, существенно отличающихся по своим свойствам, нельзя изготовлять одинаковыми способами. В связи с этим получили распространение разнообразные технологические процессы, отличающиеся специфическими производственными приемами. Следует также отметить, что преимущественное развитие получают технологические процессы, позволяющие в максимальной степени механизировать и автоматизировать производство. ✓

РАЗДЕЛ I

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛИТЕЙНЫХ ПРОЦЕССОВ

ГЛАВА I. ОСНОВЫ ПРИГОТОВЛЕНИЯ ЛИТЕЙНЫХ СПЛАВОВ

§ 1. ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

Металлические сплавы в твердом состоянии представляют собой либо раствор различных легирующих добавок (металлов и неметаллов) в металле-основе, либо механическую смесь таких растворов и промежуточных фаз, образованных основой и легирующими добавками. Кроме основы и легирующих добавок (компонентов), в сплавах всегда присутствуют примеси, попадающие в процессе приготовления сплавов. Примеси могут быть растворены в сплаве или же присутствовать в нерастворенном виде, образуя взвесь.

Жидкие металлические сплавы принято называть *расплавами*. Металлические расплавы представляют собой очень сложную систему, содержащую большое количество взвешенных частиц нерастворимых примесей. Во многих случаях металлические расплавы имеют микрогетерогенное строение. В технических расчетах металлические расплавы можно условно считать истинными растворами.

Различают черные и цветные сплавы. Сплавы на основе железа (чугуны и стали) называют черными. Цветными называют сплавы на основе меди (бронзы, латуни), алюминия, цинка, магния и пр. Металлические сплавы, используемые в народном хозяйстве, можно подразделить на две группы: деформируемые и литейные. Деформируемые сплавы предназначены для получения деформированных полуфабрикатов — поковок, штамповок, различных видов проката (профилей, листов, проволоки). Из деформируемых сплавов вначале получают слитки, которые затем деформируют различными способами обработки давлением. Из литейных сплавов получают фасонные отливки, которые после механической обработки используют как детали машин и элементы конструкций. Четкого деления сплавов на деформируемые и литейные не существует. Имеется ряд марок сталей, латуней, бронз, которые используют как для получения деформированных полуфабрикатов, так и для производства фасонных отливок. Чугуны являются типично литейными сплавами, которые никогда не подвергают пластическому деформированию. Кроме рабочих сплавов, идущих непосредственно на получение фасонных отливок или деформированных полуфабрикатов, в литейном производстве и в металлургии

широко используют так называемые лигатуры. *Лигатурой* называют сплав, применяемый только в процессе получения рабочих сплавов. Лигатура состоит обычно из основы рабочего сплава с добавками одного или нескольких легирующих компонентов рабочего сплава; при этом содержание легирующих компонентов в лигатуре в 10—20 раз больше, чем в рабочем сплаве. С помощью лигатур удается быстро и с меньшими потерями ввести в расплав очень тугоплавкие, окисляющиеся, летучие или дорогие добавки.

Для производства отливок необходим сплав заданного состава в жидком состоянии. Технологию приготовления металлических расплавов должна обеспечивать высокое качество отливок, быть простой и надежной, осуществляться с минимальными расходами металлов, энергии, различных материалов, трудовыми затратами, с наименьшим ущербом здоровью работающих и состоянию окружающей среды.

Создание такой технологии невозможно без знания физических и физико-химических свойств жидких металлов и сплавов, без анализа возможных процессов взаимодействия расплавов с газами, с огнеупорными материалами и т. д.

Температура плавления металла во многом предопределяет используемые при плавке вид топлива или энергии и способ нагрева металла. В табл. I приведены температуры плавления наиболее широко применяемых металлов.

Температура плавления сплавов может быть однозначно определена по соответствующей диаграмме состояния. Это довольно просто сделать для двойных и тройных сплавов. В случае же многокомпонентных сплавов с большим содержанием добавок необходимо прибегать к практическим замерам.

При приготовлении сплавов желательно, чтобы температура плавления вводимых добавок была близка к температуре расплава. При введении тугоплавких добавок затягивается плавка, увеличиваются потери металла в результате его окисления. Слишком низкая температура плавления добавок вызывает затруднения при плавке; поскольку такие добавки могут затеряться в шлаке, стремятся подобрать такой вид добавки, чтобы разница температур их плавления и расплава была наименьшей. Это достигается применением лигатур.

Плотность металлов и сплавов предопределяет массу заготовки и изделия. Данные о плотности необходимы для определения количества расплава, нужного для заполнения литейной формы. Знание плотностей расплава и всех добавок, которые предстоит ввести в сплав, позволяет предвидеть их поведение и рационально проводить плавку. Если добавки обладают значительно меньшей плотностью, чем расплав, они будут плавать на поверхности, окисляться и ошлаковываться. Если же они значительно тяжелее расплава, то будут погружаться на дно плавильной ванны, и не всегда удастся надежно проверить, насколько полно они растворились.

Таблица 1

Физические свойства чистых металлов

Металл	Атомная масса	Температура, °С		Плотность металла, 10 ³ кг/м ³		Изменение плотности при кристаллизации, %	Давление пара при температуре плавления, Па	Удельное электрическое сопротивление жидкого металла при температуре кристаллизации, 10 ⁻⁸ Ом·м	Удельная теплоемкость жидкого металла, 10 ³ Дж/(кг·К)	Удельная теплота плавления, 10 ³ Дж/кг
		плавления	кипения	твердого при 20 °С	жидкого при температуре кристаллизации					
Sn	118,69	232	2600	7,3	7	3,5	10 ⁻²¹	50	0,25	60
Pb	207,19	327	1900	11,35	10,68	3,5	10 ⁻⁸	95	0,15	24
Zn	65,37	419	910	7,15	6,57	4	13,3	40	0,48	110
Mg	24,80	650	1100	1,74	1,59	5	520	27	1,36	370
Al	26,98	660	2500	2,7	2,31	5	10 ⁻⁶	24	1,08	400
Cu	63,55	1083	2500	8,96	8	5,5	0,13	21	0,50	205
Mn	54,94	1243	2060	7,44	7,05	2	150	40	0,80	270
Si	28,09	1410	3200	2,35	2,53	-10	0,13	80	1,05	1800
Ni	58,71	1455	2900	8,90	7,9	5,3	1,3	85	0,62	290
Fe	55,86	1539	2900	7,87	7	5	1,3	140	0,80	270
Ti	47,90	1670	3100	4,5	4,1	5	1,3	175	0,70	390
Cr	52,00	1875	2500	7,15	6,3	5	10 ³	32	0,78	400
Mo	95,94	2620	4600	10,20	9,3	5	1,3	60	0,57	340

Плотность металлов и сплавов в твердом состоянии с повышением температуры снижается вследствие теплового расширения, которое характеризуется температурными коэффициентами линейного и объемного расширения. При переходе в жидкое состояние, т. е. при плавлении, у большей части металлов наблюдается уменьшение плотности, которое составляет 3—5 %. Это изменение плотности $\Delta\rho = (\rho_{\text{ТВ}} - \rho_{\text{Ж}}) \cdot 100/\rho_{\text{ТВ}}$, где $\rho_{\text{ТВ}}$ и $\rho_{\text{Ж}}$ — плотности соответственно твердого и жидкого металла при температуре плавления (кристаллизации). У кремния значение $\Delta\rho$ отрицательно. Это означает, что при плавлении плотность кремния возрастает, т. е. кремний ведет себя подобно воде. Точно так же ведут себя галлий, висмут, сурьма, германий, у которых $\Delta\rho = -(1 \div 5) \%$.

Ориентировочно можно считать, что плотность обычных металлов в жидком состоянии вблизи точки начала кристаллизации составляет 0,9 плотности при 20 °С. Повышение температуры всех жидких металлов и сплавов сопровождается монотонным снижением плотности вследствие теплового расширения, при этом коэффициент объемного расширения в 1,5—3 раза больше, чем в твердом состоянии.

Плотность сплавов $\rho_{\text{спл}}$ в жидком и твердом состояниях может быть в первом приближении вычислена по плотности чистых металлов — компонентов ($\rho_A, \rho_B \dots \rho_i$) и их содержанию в % ($x_A, x_B \dots x_i$): $100/\rho_{\text{спл}} = x_A/\rho_A + x_B/\rho_B + \dots + x_i/\rho_i$.

Изменение плотности металлов и сплавов с изменением температуры имеет очень большое значение для технологии получения литых заготовок. Увеличение плотности при охлаждении расплава и его кристаллизации, выражающееся в уменьшении объема, предопределяет так называемую *объемную усадку*, которая проявляется в понижении уровня расплава в литейной форме и образовании в отливке пустот — усадочных раковин и пористости. Рост плотности металла или сплава в твердом состоянии при охлаждении приводит к сокращению линейных размеров отливки, т. е. к линейной усадке. Правильно разработанная технология получения отливки должна обеспечивать отсутствие в ней пустот и заданные линейные размеры.

Жидкие металлы и сплавы характеризуются определенной динамической вязкостью. Более тугоплавкие металлы обладают большей динамической вязкостью (3—5 МПа·с). Динамическая вязкость олова, алюминия, магния практически такая же, как вязкость воды при 20 °С (1—1,5 МПа·с). Перегрев жидких металлов всегда сопровождается снижением динамической вязкости. Ощутимое увеличение вязкости, заметное при перемешивании или при переливах расплава, связано обычно либо с началом кристаллизации, либо с сильным загрязнением расплава мелкими (размером не более 3—5 мкм) инородными частицами оксидов, шлака и пр.

Диффузия в металлических расплавах определяется коэффициентом диффузии $D_{\text{ж}}$, который составляет в среднем $(1—5) \times 10^{-9}$ м²/с и значительно возрастает с увеличением температуры. Элементы с малыми размерами атомов (углерод, бор, азот) обладают в металлических расплавах коэффициентом диффузии примерно в 10 раз большим среднего. Наибольший коэффициент диффузии у водорода — $D_{\text{ж}}^{\text{H}} = (1 \div 2) 10^{-7}$ м²/с.

Расчеты показывают, что заметный массоперенос в расплавах в результате диффузии происходит лишь на расстояниях не более нескольких миллиметров. Поэтому для обеспечения равномерного распределения вводимых в расплав добавок необходимо принудительное перемешивание.

Температура кипения металлов никак не связана с их температурой плавления (см. табл. 1). Цинк, более тугоплавкий, нежели олово, кипит при весьма низкой температуре (910 °С), тогда как олово кипит при очень высокой температуре (2600 °С), превышающей температуру кипения меди (2500 °С). Следует помнить, что *температурой кипения* называют температуру, при которой давление пара достигает атмосферного давления ($1,01 \cdot 10^5$ Па).

Давление пара металла при температуре плавления является важным свойством для оценки поведения металла. Некоторые

металлы обладают очень большими значениями давления пара при температуре плавления, например, цинк, магний, марганец, хром. Их плавка характеризуется значительными потерями вследствие испарения, которое становится особенно интенсивным при плавке в вакууме. Давление пара сплава определяется суммой парциальных давлений входящих в его состав компонентов.

Введение в расплав летучих добавок, т. е. обладающих большим давлением пара при данной температуре, приводит не только к потерям вследствие усиленного испарения, но может сопровождаться выбросами расплава. Поэтому обычно летучие добавки стремятся вводить в виде лигатур.

Электрическое сопротивление жидких металлов в 5—15 раз больше, чем твердых при нормальной температуре, и находится в пределах $(20 - 175) 10^{-8}$ Ом·м (см. табл. 1). У жидких сплавов оно зависит от состава. Для оценочных расчетов электрическое сопротивление жидкого сплава можно принимать по основному компоненту. Величина электрического сопротивления расплава предопределяет работу индукционных электрических плавильных печей, где тепловая энергия выделяется в самом расплаве от индуцируемых токов.

Теплота плавления и теплоемкость жидкого и твердого металла определяют количество энергии, которое необходимо для получения расплава и его нагрева до заданной температуры. Эти характеристики необходимы для тепловых расчетов плавильного оборудования. Тепловые расчеты литейной формы основаны на учете теплосодержания расплава, определяемого его теплоемкостью и теплотой плавления. В табл. 1 приведены значения теплоемкости жидких металлов вблизи точки кристаллизации. В среднем эти значения на 10—15 % больше, чем теплоемкость твердых металлов около точки плавления. Полезно помнить, что молярная теплоемкость всех жидких металлов составляет 27—32 Дж/(моль·К). Удельная теплота плавления металлов колеблется в очень широких пределах: от $24 \cdot 10^3$ Дж/кг у свинца до $400 \cdot 10^3$ Дж/кг у алюминия и хрома. Особенно велика теплота плавления у кремния — 1800 Дж/г. Это связано с тем, что кремний обладает кубической решеткой, подобной алмазу, с прочными ковалентными связями. Теплоемкость и теплота плавления сплавов в первом приближении могут быть рассчитаны по свойствам компонентов с учетом их содержания.

Теплопроводность жидких металлов примерно в 2 раза меньше теплопроводности твердых металлов вблизи температуры плавления. Поскольку в жидкости возможна тепловая конвекция, чисто физическая теплопроводность играет подчиненную роль. Расчеты показывают, что теплопередача за счет конвекции в расплавах происходит в 15—20 раз интенсивнее, чем за счет физической теплопроводности.

Строение металлических расплавов в настоящее время служит объектом многочисленных исследований. Из близости многих

физических свойств металлов в твердом и жидком состоянии следует, что строение жидкого металла должно быть в определенной мере похожим на строение твердых металлов, обладающих кристаллической структурой. В жидких металлах имеется так называемый ближний порядок, выражающийся в том, что расположение ближайших соседей каждого атома и их число являются статистически постоянными характеристиками. Также установлено, что в жидких металлах имеются микрогруппировки с таким же расположением атомов, как в кристаллах твердого металла. Эти микрогруппировки, содержащие несколько десятков атомов, называют *кластерами*. В жидких металлах кроме кластеров обнаружена бесструктурная жидкость. С ростом температуры число кластеров убывает, количество бесструктурной жидкости возрастает.

В связи с тем, что строение расплавов изменяется с температурой, имеется возможность влиять на состояние расплава путем его перегрева и воздействовать, таким образом, на структуру и свойства твердого сплава. Подобная обработка некоторых сплавов дает практически ощутимые результаты.

§ 2. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ С ГАЗАМИ

Взаимодействие металлических расплавов с газами представляет собой сложные физико-химические процессы, направленные в сторону равновесия. При плавке в реальной обстановке полное равновесие между газообразной и жидкой фазами достигается крайне редко. Поэтому термодинамические расчеты для состояния равновесия в большинстве случаев показывают лишь направление взаимодействия, которое будет прервано до достижения равновесия.

Для технологии плавки важным является вид взаимодействия расплава с газовой средой. Взаимодействие может и не быть из-за полной взаимной инертности расплава и газа. Взаимодействие может выражаться в образовании химических соединений металл—газ при практическом отсутствии растворимости газа в расплаве, а также раствора газа в расплаве, вслед за чем может начаться возникновение химических соединений.

Наилучшим случаем для плавки является полная инертность в системе газ—металл. Примерами таких систем могут служить любые металлы (сплавы) с инертными газами (аргоном, гелием и др.). Плавка металла в подобной газовой среде не сопряжена ни с потерями металла, ни с его загрязнением. Если взаимодействие расплава с газом сводится к образованию соединений без заметной растворимости газа в расплаве, то в этом случае расплав загрязняется частицами соединений металл—газ (оксидами, нитридами) в виде жидких капель, плен или кристаллов-дендритов. Исключить такое взаимодействие можно лишь снижением парци-

ального давления реагирующего газа до значения, равного или меньшего давления диссоциации образующегося при данной температуре соединения металл—газ.

Третий вид взаимодействия расплавов с газами характеризуется образованием растворов газов в расплаве. Как известно, растворимость двухатомного газа $[Г]$ в металлах зависит от давления газа $P_{Г_2}$ и от температуры T следующим образом:

$$[Г] = k \sqrt{P_{Г_2}} \exp[-\Delta H/(RT)],$$

здесь k — постоянный коэффициент; R — газовая постоянная; ΔH — теплота растворения 1 моля газа $Г_2$ в расплаве.

Значение ΔH может быть положительным и отрицательным. В случае $\Delta H > 0$ процесс растворения газа является эндотермическим и повышение температуры вызывает увеличение содержания газа в расплаве (рис. 3, кривая 1). При $\Delta H \leq 0$ растворение газа происходит с выделением теплоты, т. е. является экзотермическим процессом, и повышение температуры вызывает снижение содержания газа в растворе (рис. 3, кривая 2). Если температура постоянна, рассматриваемая зависимость переходит в закон Сивертса $[Г] = k_1 \sqrt{P_{Г_2}}$, где k_1 — постоянный коэффициент.

Изменения растворимости газа в металле в зависимости от температуры имеют большое значение для получения плотных беспористых отливок. В случае, если растворимость газа снижается при понижении температуры и кристаллизации, в расплаве, залитом в литейную форму, будут образовываться газовые пузыри из-за выделения избыточного для низких температур количества газа. Эти газовые пузыри «запутываются» в растущих кристаллах, и отливка получается пористой. Если же $\Delta H < 0$ и растворимость газа растет с понижением температуры, то подобное явление невозможно, поэтому отливка не будет пористой.

В табл. 2 приведены данные о взаимодействии жидких металлов с различными газами, а также с углеродом. Взаимодействие расплава с углеродом предопределяет возможность растворения монооксида углерода, поэтому данный элемент включен в табл. 2. Важно иметь в виду, что в этой таблице отражено только существование раствора газа в жидком металле или отсутствие такого раствора. Количество растворенного газа в таблице не указано, так же как и возможность образования соединений металл—газ.

Взаимодействие с водородом. Хотя содержание водорода в воздухе ничтожно, в жидких металлах этот газ составляет основ-

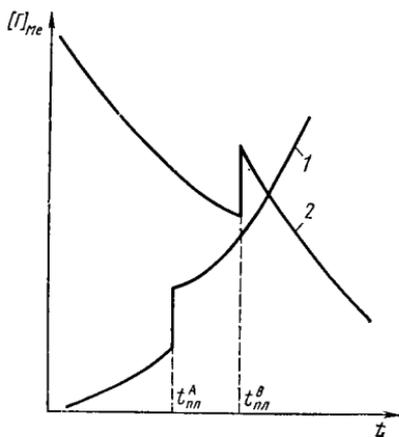


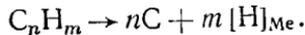
Рис. 3. Зависимость растворимости газов в металлах от температуры при постоянном давлении

Взаимодействие жидких металлов с газами и углеродом

Газ	Sn	Pb	Zn	Mg	Al	Cu	Mn	Ni	Fe	Ti	V	Cr	Mo
Водород	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Кислород	—	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+
Азот	—	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+	+
Углерод	—	—	—	—	—	—	+	+	+	+	+	+	+

Примечание. Знак «+» указывает на существенную растворимость газа или углерода в жидком металле, знак «—» — на незначительную.

ную долю растворенных газов. Водород попадает в жидкие металлы вследствие разложения воды расплавом, а также из-за термического разложения углеводородов топлива:



Легкоплавкие металлы практически не растворяют водород. Растворимость становится значительной начиная с магния (см. табл. 2). Растворение водорода в ряду от магния до железа включительно сопровождается поглощением теплоты, поэтому повышение температуры вызывает увеличение содержания газа в растворе, а снижение температуры — его уменьшение. В связи с этим в данных металлах при охлаждении и кристаллизации возможно образование газовой пористости, если расплав содержит большое количество водорода. В титане и ванадии растворение водорода является экзотермическим процессом, растворимость растет с понижением температуры, и образование водородной пористости невозможно.

Растворимость водорода при $P_{\text{H}_2} = 10^5$ Па в металлах указана в табл. 3. В этой таблице приведена растворимость водорода в твердом и жидком металле при температуре кристаллизации $t_{\text{кр}}$ и в жидком металле при перегреве на 100°C ($t_{\text{кр}} + 100^\circ\text{C}$).

Взаимодействие жидких сплавов с водородом определяется их составом. Введение в сплав компонентов, способных значительно

Таблица 3

Растворимость водорода, см³/100 г, в металлах

Состояние металла	Температура	Mg	Al	Cu	Ni	Fe	Ti
Твердый	$t_{\text{кр}}$	20	0,05	3	20	12	1500
Жидкий	$t_{\text{кр}}$	30	0,7	5	40	24	1100
»	$t_{\text{кр}} + 100^\circ\text{C}$	40	1	7	45	30	150

растворять водород, повышает растворимость этого газа в расплаве. Так действуют никель в сталях и медных сплавах, магний в алюминиевых сплавах.

Взаимодействие с кислородом. Все жидкие металлы активно взаимодействуют с кислородом. Конечным продуктом являются оксиды. Легкоплавкие металлы от олова до алюминия (см. табл. 2) практически не растворяют кислород. Взаимодействие этих металлов с кислородом сразу приводит к образованию оксидных плен на поверхности расплава. Все остальные металлы способны растворять кислород в определенных количествах, после чего начинается образование соответствующих оксидов.

Металлы, растворяющие кислород и обладающие небольшим сродством к кислороду (энергия образования свободных оксидов при заданной температуре — энергия Гиббса — невелика), образуют при взаимодействии сплавы, которые способны растворять этот газ, например, железоникелевые, медноникелевые.

Если же сплавы на основе подобных металлов содержат даже небольшие количества металлов, обладающих значительно большим сродством к кислороду, растворимость кислорода резко снижается. При взаимодействии с кислородом таких сплавов на поверхности образуются пленки, состоящие из оксидов металла, наиболее активного по отношению к кислороду. Подобным образом ведут себя сплавы на основе железа и никеля с кремнием, титаном или алюминием, сплавы на основе меди с оловом, цинком, алюминием, кремнием, хромом.

Взаимодействие с азотом. Азот растворяется в жидких металлах с высокой температурой плавления — начиная с марганца (см. табл. 2). Растворение азота в марганце, никеле и железе сопровождается поглощением теплоты, поэтому понижение температуры вызывает уменьшение растворимости азота в этих металлах. Отсюда возникает вероятность образования газовой пористости, вызванной выделением из раствора азота.

В титане и других тугоплавких металлах азот растворяется с выделением теплоты, поэтому растворимость при понижении температуры увеличивается и, следовательно, газовая пористость образовываться не может.

Растворимость азота в жидких сплавах в общем случае пропорциональна содержанию компонентов. Исключение составляют сплавы на основе железа и никеля с добавками алюминия и титана. В этих жидких сплавах при контакте с газовой средой, содержащей азот, образуются твердые нитриды титана и алюминия в виде включений. Для легкоплавких металлов от олова до алюминия и всех их сплавов, а также меди и медных сплавов азот является практически нейтральным газом.

Взаимодействие с парами воды. Большая часть металлов находясь в жидком состоянии, разлагает воду. Результаты взаимодействия расплава с водой зависят от характера его взаимодействия с водородом и кислородом. Если расплав не способен раство-

рять ни водород, ни кислород, то в результате контакта с влагой расплав будет покрываться пленкой оксидов, а водород будет уходить в атмосферу. Так ведут себя олово, свинец, цинк и все сплавы на их основе. Если же расплав не растворяет кислород, но растворяет водород, происходит и окисление поверхности расплава, и насыщение расплава растворенным водородом. Это характерно для магния, алюминия и всех их сплавов. Если расплав способен растворять и кислород, и водород (см. табл. 2), то именно это и будет происходить. При этом конечное равновесие в системе будет определяться парциальным давлением паров воды и концентрациями кислорода и водорода в расплаве.

Взаимодействие с монооксидом углерода. Это взаимодействие определяется возможностью прохождения реакций $Me + CO \rightarrow MeO + C$; $Me + CO \rightarrow [Me + O] + C$; $Me + CO \rightarrow [Me + C + O]$.

Свинец, олово и медь практически с монооксидом углерода не взаимодействуют, и CO для этих металлов может рассматриваться как нейтральный газ. Для цинка, магния, алюминия CO является окислительным газом, и взаимодействие с ним приводит к образованию нерастворимых оксидов на поверхности расплава. Для всех прочих металлов, указанных в табл. 2, между атмосферой, содержащей CO, и расплавом устанавливается равновесие, характеризуемое определенным содержанием кислорода и углерода в расплаве. Важным является то, что при понижении температуры это равновесие сдвигается влево, в сторону образования CO. Следовательно, расплавы этих металлов, содержащие растворенные углерод и кислород, при охлаждении и кристаллизации могут поражаться газовой пористостью, образованной CO. Подобное явление происходит при кристаллизации кипящих деформируемых сталей и литейных углеродистых сталей в случае недостаточного раскисления.

§ 3. ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ С ОГНЕУПОРНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

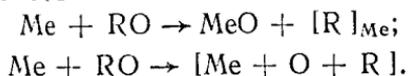
Материалы, которыми футеруют плавильные печи и из которых изготовляют плавильные тигли, должны быть при высоких температурах механически прочными и химически стойкими, чтобы выдерживать воздействие металлического расплава, его оксидов, шлака, флюсов.

Огнеупорные материалы могут состоять из SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , Cr_2O_3 , ZrO_2 и других оксидов. Наиболее часто применяют шамот (60—75 % SiO_2 , ост. Al_2O_3), динас (более 95 % SiO_2 ост. примеси), магнезит (80 % MgO , ост. CaO), хромомагнезит (45—50 % MgO , 30—35 % Cr_2O_3 , ост. SiO_2), циркон (65 % ZrO_2 , 35 % SiO_2), высокоглиноземистые огнеупоры (более 50 % Al_2O_3 , ост. SiO_2). Самым дешевым и доступным огнеупорным материалом является шамот.

Огнеупорные материалы характеризуют по так называемой огнеупорности. Она выражается температурой в °С, при которой материал способен выдержать напряжение сжатия 0,2 МПа:

	Огнеупорность, °С
Циркон	1700
Дина	1600
Магнезит	1550
Хромомагнезит	1500
Высокоглиноземистые огнеупоры	1500
Шамот	1300

Химическая стойкость огнеупоров определяется возможностью прохождения реакции между жидким металлом Me и огнеупорным оксидом RO:



В результате этой реакции разрушается футеровка, расплав загрязняется оксидами и примесью R или кислородом и примесью R. Возможность такого взаимодействия оценивается уменьшением энергии Гиббса.

Кроме химического взаимодействия огнеупорного оксида собственно с металлом, возможно также взаимодействие огнеупорного оксида с оксидами металла, выражающееся во взаимном растворении. Оценить такое взаимодействие можно по виду диаграммы состояния MeO—RO. Если в этой системе имеются эвтектики, плавящиеся ниже рабочей температуры расплава, то при плавке на воздухе обязательно будет происходить активное разъедание футеровки с образованием шлака.

Легкоплавкие металлы — олово, свинец, цинк — имеют столь низкие температуры плавления, что для их плавки пригодны любые из рассмотренных огнеупорных материалов. При плавке свинца и его сплавов на шамоте при перегревах до 750 °С возможно оплавление футеровки вследствие того, что в системе PbO—SiO₂ имеется эвтектика с температурой плавления 715 °С.

Если учитывать только огнеупорность материала, то магний и его сплавы с рабочими температурами расплавов до 850 °С можно было бы готовить в печах с шамотной футеровкой. Однако жидкий магний активно восстанавливает кремний из кремнезема, поэтому магниевые сплавы готовят только на магнезитовой футеровке или в стальных тиглях. При плавке алюминия и его сплавов также происходит восстановление кремния из кремнезема футеровки, однако шамот, как наиболее дешевый и доступный материал, широко используют для приготовления алюминиевых сплавов, если примесь кремния присутствует в допустимых пределах.

Медь и медные сплавы плавят на шамотной футеровке, так как она достаточно механически и химически стойка. Лишь для приготовления сплавов меди с цирконием, хромом, титаном необходима магнезитовая футеровка.

Для плавки сплавов на основе никеля и железа обычный шамот непригоден из-за недостаточной огнеупорности, поэтому используют динас (для плавки углеродистых сталей), магнезит, хромомагнезит, циркон.

Для плавки тугоплавких металлов (титана, хрома, циркония, ниобия, молибдена, вольфрама) никакие огнеупорные материалы непригодны по причине недостаточной огнеупорности и активного взаимодействия с расплавом, имеющим температуру более 2000 °С. Поэтому все тугоплавкие металлы плавят в специальных медных водоохлаждаемых тиглях-кристаллизаторах.

В качестве огнеупорного материала для плавки металлов иногда используют графит. Чистый графит пригоден лишь для приготовления сплавов, не растворяющих углерод. Кроме того, его применение требует защитной атмосферы, поскольку выше 600 °С графит на воздухе быстро сгорает. Как добавка в оксидные огнеупоры, графит повышает стойкость материала. Из подобных материалов известен графитошамот (40—50 % графита), широко используемый для изготовления плавильных тиглей.

Расплавы с рабочими температурами до 900 °С можно готовить в стальных и чугунных тиглях. Главная опасность при этом состоит в возможном насыщении расплава железом. Это насыщение нетрудно определить по диаграмме состояния железо—расплавленный металл.

§ 4. ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ ПЛАВКИ

В процессе плавки всегда имеют место потери металла, так что масса полученного расплава оказывается несколько меньше массы металла, загруженного в печь или тигель. Потери при плавке составляют от десятых долей процента до нескольких процентов. Потери связаны с окислением металла, его испарением, взаимодействием с огнеупорной футеровкой.

Весь металл, который загружается в печь для плавки, называется *шихтой*. Шихта может состоять из чистых металлов, полученных с металлургических предприятий, а также отходов и лома, полученного со стороны, собственных отходов в виде бракованной продукции металлообрабатывающих цехов, стружки, бракованных отливок, литников, прибылей. Все эти шихтовые материалы загрязнены песком, т. е. кремнеземом SiO_2 . При плавке образующиеся оксиды металлов сплавляются с кремнеземом, и возникает естественный шлак, содержащий металл в связанном виде. Кроме того, в шлаке имеются капли свободного металла, механически захваченные при перемешивании. Таким образом, часть металла теряется со шлаком. Другая часть потерь связана с испарением металла и взаимодействием расплава с огнеупорной футеровкой. Эти потери можно обнаружить лишь по разности между массой шихты и массой полученного расплава и потерь со шлаком. Поэтому эти потери называют потерями на угар.

Перед проведением плавки производят расчет шихты для того, чтобы определить количество шихтовых материалов, необходимое для получения сплава заданного состава в заданном количестве с учетом потерь при плавке. В простейших случаях расчет шихты сводится к решению одного или нескольких уравнений. При сложном составе сплава, большом числе шихтовых материалов и необходимости найти их оптимальный набор из условия наименьшей стоимости проводятся расчеты на ЭВМ.

В первую очередь в печь загружают ту шихту, доля которой в навеске наибольшая, а также наиболее тугоплавкие шихтовые материалы. Легколетучие, сильноокисляющиеся и малые добавки желателно вводить с помощью лигатур. При необходимости на первую порцию шихты следует сразу же засыпать специальный шлак или флюс. Для надежного растворения всех добавок нужно обязательно перемешивать расплав. При необходимости по окончании плавления проводят рафинирование расплава, а также его окисление. Заключительной операцией является модифицирование расплава путем введения добавки или температурно-временной обработкой. Перед самой разливкой расплав необходимо выдержать в спокойном состоянии в течение 10—20 мин для отделения (всплывания) частиц шлака, оксидов, газовых пузырьков. Температура расплава перед разливкой в общем случае превышает температуру ликвидуса на 100—200 °С.

Плавка под шлаками и флюсами в общем случае проводится для защиты расплавов от взаимодействия с воздухом. Покровный шлак или флюс должны быть более легкоплавкими, чем расплав, не взаимодействовать с ним, быть легче расплава. Для плавки сплавов на основе железа (сталей, чугунов) используют шлаки на основе системы CaO—SiO_2 . Для никелевых сплавов чаще применяют более легкоплавкие составы системы $\text{CaO—SiO}_2\text{—Na}_2\text{O}$ (обычное стекло) и CaO—CaF_2 . Для медных сплавов используют систему $\text{SiO}_2\text{—Na}_2\text{O}$ с добавками хлоридов и фторидов натрия, кальция, буры. Для магниевых сплавов основой флюсов служит карналлит KCl·MgCl_2 ; алюминийевые сплавы в случае использования грязной и мелкой шихты (стружки, лома) плавят также под защитой флюса из карналлита с добавками хлоридов и фторидов натрия и кальция.

Рафинирование расплавов. В результате взаимодействия расплавов с воздухом и влагой они могут загрязняться растворенными кислородом, азотом, водородом. В случае образования нерастворимых оксидов частицы этих соединений могут замешиваться в расплав, загрязняя его. Расплав может быть загрязнен также каплями шлаков, флюсов, частицами разрушенной футеровки. В самой шихте, как правило, имеется достаточно много загрязнений, часть которых переходит в расплав. Удаление растворенных металлических и неметаллических примесей является чисто металлургической операцией.

Для литейного производства специфичным является *рафинирование* расплавов, т. е. их очищение от неметаллических включений и растворенных газов. Неметаллическими включениями являются в основном оксиды. Поддаются удалению только первичные и вторичные докристаллизационные включения (по классификации В. И. Явойского), которые существуют в расплаве до начала кристаллизации.

Для удаления неметаллических включений используют несколько приемов. Простейший из них — отстаивание. Частицы неметаллических включений, как более легкие, чем расплав, всплывают к поверхности и переходят в шлак. Отстаиванием могут быть удалены лишь сравнительно крупные частицы, движение которых приближенно описывается формулой Стокса. Включения, имеющие радиус менее 5 мкм, практически не отделяются, так как легко переносятся конвективными потоками и участвуют в броуновском движении.

Более действенный способ удаления неметаллических включений заключается в обработке расплава рафинирующими шлаками или флюсами. Расплав перемешивают со шлаком или флюсом. Частицы неметаллических включений либо прилипают к каплям шлака или флюса за счет смачивания, либо просто растворяются в них. После обработки расплав необходимо отстаивать. Рафинирующие шлаки и флюсы отличаются от покровных тем, что они более легкоплавки и содержат оксид натрия Na_2O , фторид кальция CaF_2 , криолит Na_3AlF_6 , которые хорошо растворяют оксидные включения.

Неметаллические включения хорошо отделяются при продувке расплавов газами. Мелкие пузырьки газа, проходя через толщу расплава, встречаются с инородными частицами, которые прилипают к ним и выносятся на поверхность.

Универсальным и наиболее действенным способом удаления неметаллических включений является фильтрование расплава через зернистые или спеченные пористые фильтры. Несмотря на то, что диаметр пор в подобных фильтрах довольно велик (до 3 мм), они способны удерживать частицы размером несколько микрометров. Отделение частиц происходит не только за счет механического удержания, но главным образом за счет адгезии включений к поверхности каналов — пор фильтра.

Рафинирование расплавов от растворенных газов, кроме кислорода, осуществляется вакуумированием, продувкой расплавов другими нерастворимыми в них газами и вымораживанием. Поскольку концентрация растворенного в расплаве газа по закону Сиверта пропорциональна парциальному давлению газа в степени 0,5, снижая общее давление над расплавами и уменьшая соответственно парциальное давление растворенного газа, можно добиться выделения газа из расплава. Практически для удаления водорода и азота оказывается достаточным понизить общее давление до 0,1—0,2 атмосферного, т. е. до $(1 - 2) 10^4$ Па.

Дегазация расплавов путем продувки нерастворимыми газами основана на том же физическом явлении. Появившийся в расплаве пузырек этого газа не содержит в себе растворенного газа, иначе говоря, парциальное давление растворенного газа в нем равно нулю. По этой причине газ из раствора переходит в пузырек продуваемого газа, и, таким образом, происходит понижение содержания газа в расплаве. Для продувки металлических расплавов можно использовать аргон, гелий (для всех сплавов), азот (для медных и алюминиевых). Для алюминиевых сплавов применяют также летучие хлориды, вводимые в расплав в твердом виде и возгоняющиеся в нем (хлориды алюминия, цинка, марганца), а также гексахлорэтан. Во всех случаях необходимо минимальное содержание влаги в продуваемом газе или летучем хлориде, иначе вместо дегазации может произойти насыщение расплава водородом.

Для дегазации можно использовать прием вымораживания расплава, заключающийся в медленном охлаждении расплава в печи до почти полного затвердевания с последующим быстрым подъемом температуры до нужного уровня. При медленном охлаждении газы (водород, азот) постепенно выделяются из раствора (см. рис. 3, кривая 1).

Часто проводят предварительную переплавку шихты, загрязненной влагой, маслом, и полученный расплав разливают в чушки. Последующая плавка позволяет получать значительно менее газонасыщенный расплав.

Раскисление и модифицирование расплавов. *Раскислением* называют удаление из расплава растворенного кислорода. Раскисление может быть проведено несколькими способами. Наиболее универсальным является так называемое внутреннее (осадочное) раскисление, которое заключается во введении в расплав специальных добавок, связывающих кислород в нерастворимые в расплаве соединения. Таким образом, выбор раскислителя Me' для раскисления металла определяется прежде всего возможностью и полнотой прохождения реакции $[Me'] + [O] \rightarrow Me'O$. В наиболее простом случае, когда продуктом раскисления является свободный оксид $Me'O$, константа равновесия этой реакции может быть вычислена по энергии образования этого оксида за вычетом энергии образования растворов $[Me']$ и $[O]$. Раскисление пройдет тем полнее, чем больше будет уменьшение энергии написанной выше реакции. Вместе с тем в расплаве всегда будут оставаться растворенный кислород и раскислитель. Чем меньше их содержание, тем выше качество раскислителя.

Выбор раскислителя определяется также видом и состоянием продуктов раскисления. Осадочное раскисление приводит к появлению в расплаве очень большого количества неметаллических включений, которые называют эндогенными, поскольку они возникают непосредственно в расплаве. Эти неметаллические включения должны быть удалены из расплава, обычно это достигается

отстаиванием. Наилучшие условия для удаления включений создаются, если они имеют компактную, лучше всего шарообразную форму и возможно меньшую плотность. Такие условия обеспечиваются, если включения находятся в газообразном или жидком состоянии. Именно по этим причинам для раскисления меди используют фосфор (продукты — жидкие фосфаты меди), для никелевых сплавов — углерод (продукты — пузыри CO), для сталей — сложные раскислители, содержащие кремний, марганец, кальций (продукты — жидкие силикаты). Лишь для завершения раскисления в стали обычно добавляют более сильный раскислитель — алюминий, дающий в расплаве практически неотделяемую взвесь твердых частиц.

В заключение необходимо подчеркнуть, что раскисление как одну из операций при плавке проводят только применительно к расплавам, содержащим растворенный кислород. Поэтому раскисляют углеродистые и низколегированные стали, сплавы железо—никель, никель—медь, чистую медь. Раскисление сплавов железа с большим содержанием углерода, кремния, титана, хрома, сплавов никеля с алюминием, титаном, сплавов меди с алюминием, цинком, оловом, всех сплавов на основе алюминия, магния, цинка, свинца, олова никогда не проводят.

Как уже отмечалось, завершающей операцией при плавке является модифицирующая обработка расплава. Сам процесс модифицирования происходит при затвердевании отливок и выражается в образовании мелкокристаллической структуры. Для достижения этого в расплав в конце плавки вводят специальные модифицирующие добавки или же подвергают его температурно-временной обработке, заключающейся в перегреве с последующим быстрым охлаждением до температуры разливки. Поскольку модифицирующие добавки быстро угорают, а действие перегрева пропадает, модифицирующую обработку проводят в последнюю очередь, чтобы эффект сохранился до конца разливки.

Внепечная (ковшовая) обработка расплавов. Этот способ в последние годы получил большое распространение при производстве литых заготовок. Он характеризуется тем, что обработку расплавов проводят не в плавильном агрегате, а в ковше. Это позволяет удешевить и ускорить процесс приготовления сплавов. В ковше часто проводят рафинирование и модифицирование расплава, нередко завершают его раскисление. В ряде случаев легирующие добавки вводят в расплав при его сливе из печи в ковш. Внепечная обработка приобретает особое значение при использовании расплава первичной плавки, получаемого непосредственно из металлургического агрегата. В этот расплав вводятся необходимые легирующие присадки, он подвергается рафинированию и, если необходимо, модифицированию. Все эти операции проводят либо прямо в ковше, либо в специальных печах-накопителях, называемых миксерами. Готовый расплав используют для получения фасонных отливок или слитков. Подобная

практика получила широкое применение при производстве чугуновых изложниц из жидкого доменного чугуна на предприятиях черной металлургии и при производстве слитков из алюминиевых сплавов на предприятиях цветной металлургии.

ГЛАВА 2. ЗАТВЕРДЕВАНИЕ И ОХЛАЖДЕНИЕ ОТЛИВОК

Жидкий металл, залитый в полость литейной формы, принимает ее конфигурацию и продолжает охлаждаться. После достижения температуры ликвидуса начинается переход сплава в твердое состояние. Скорость затвердевания определяется скоростью теплоотвода и характеризует нарастание твердой фазы со временем. Затвердевание отливок происходит в результате кристаллизации сплавов, т. е. зарождения и роста кристаллов. В этот период формируется первичная структура сплава, проявляется его склонность к образованию химической неоднородности, развивается усадка, формируются поверхностные слои отливки. После полного охлаждения отливка должна иметь заданную плотность и однородность, минимальные внутренние напряжения, гладкую и чистую поверхность. Эти требования можно обеспечить только при правильном использовании законов, обуславливающих процесс кристаллизации сплава и предопределяющих меры, способные предупредить образование в отливке различных дефектов.

§ 1. ЗАТВЕРДЕВАНИЕ ОТЛИВОК

При затвердевании сплавов теплота передается литейной форме через ряд тепловых сопротивлений, которыми являются расплав, слой затвердевшего металла, форма, а также поверхность раздела металл—форма. Теплопередача осуществляется в условиях наличия температурных перепадов внутри каждой однородной среды (жидкого и твердого металла, формы) и температурных напоров на границе соприкосновения двух сред (металл—форма, форма—воздух).

Из теплофизики известно, что интенсивность процесса теплообмена определяется критерием Био

$$Bi = \alpha / (\lambda / l),$$

где α — коэффициент теплоотдачи от поверхности тела в окружающую среду; λ — коэффициент теплопроводности; l — толщина тела; λ / l — термическая проводимость данного тела.

В теплообмене обязательно участвуют две среды: отливка охлаждается (Bi_o), а форма нагревается (Bi_{ϕ}).

Литейные формы различают прежде всего по теплофизическим свойствам. Процессы затвердевания в них отливок подобны, но характеризуются различными значениями критерия Био (Bi_o

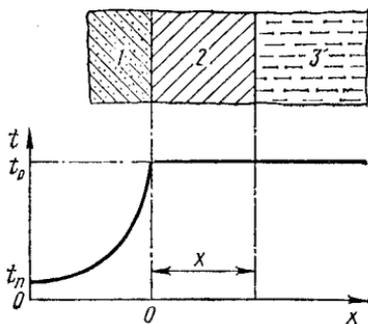


Рис. 4. Распределение температуры по сечениям отливки и песчаной формы:

1 — форма; 2 — слой твердого металла; 3 — слой жидкого металла

и Bi_ϕ), которые могут меняться от 0 до ∞ . Наиболее резко отличаются в этом смысле объемные песчаные формы и тонкостенные металлические для изготовления фасонных отливок. Проанализируем затвердевание отливок в этих формах.

В объемной песчаной форме отливка охлаждается с малой интенсивностью, так как термическая проводимость (λ_o/l_o) велика по сравнению с коэффициентом теплоотдачи α . Сама же форма нагревается с большой интенсивностью, так как ее термическая проводимость мала по сравнению с коэффициентом теплоотдачи из-за низкой теплопроводности формовочной смеси (λ_ϕ) и большой толщины (l_ϕ). Следовательно, теплофизические характеристики песчаной формы $Bi_o \ll 1$; $Bi_\phi \gg 1$.

Объемная песчаная форма может считаться полубесконечной, так как ее внешняя поверхность в период затвердевания отливки не нагревается. Если пренебречь температурными перепадами в слоях жидкого и твердого металла и представить, что внутренняя поверхность формы сразу же приобретает температуру металла, залитого без перегрева, то распределение температур в средах, участвующих в теплообмене, будет таким, какое показано на рис. 4.

Сформулированные условия соответствуют задаче о распространении теплоты в твердом теле при неустановившемся режиме, описываемой частным дифференциальным уравнением

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = a_\phi \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}, \quad (1)$$

где t — температура; τ — время; a_ϕ — коэффициент температуропроводности материала формы, $a_\phi = \lambda_\phi / (c_\phi \rho_\phi)$, здесь c_ϕ и ρ_ϕ — соответственно теплоемкость и плотность материала формы; x — расстояние от поверхности раздела металл—форма (положительное значение — в металл; отрицательное — в форму).

Удельный тепловой поток в форму через поверхность раздела описывается законом Фурье

$$\left(\frac{q}{F_o}\right)_{x=0} = -\lambda_\phi \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (2)$$

где q — тепловой поток; F_o — площадь поверхности отливки.

Совместное решение уравнений (1) и (2) дает выражение

$$\left(\frac{q}{F_o}\right)_{x=0} = -\sqrt{\frac{\lambda_\phi \rho_\phi c_\phi}{\pi \tau}} (t_o - t_n), \quad (3)$$

где t_0 — температура поверхности отливки; t_n — температура внешней поверхности формы.

Так как принято, что $t_\phi = t_0$, то температура внутренней поверхности формы является лишь функцией времени τ . Следовательно, количество теплоты, поступающее в форму, зависит только от теплоты, выделяющейся при кристаллизации. Таким образом,

$$\left(\frac{q}{F_0}\right)_{x=0} = -\rho_0 L \frac{\partial x}{\partial \tau}, \quad (4)$$

где ρ_0 — плотность материала отливки; L — удельная теплота кристаллизации. Знак минус означает, что теплота поглощается формой.

Приравняем уравнения (3) и (4) и проинтегрируем. Считая, что $x = 0$ при $\tau = 0$, получим

$$x = \frac{2}{\pi} \frac{t_0 - t_n}{\rho_0 L} \sqrt{\lambda_\phi \rho_\phi c_\phi} \sqrt{\tau}. \quad (5)$$

Уравнение (5) дает представление о совместном влиянии теплофизических свойств металла и формы на затвердевание отливки. Величина $b_\phi = (\lambda_\phi c_\phi \rho_\phi)^{1/2}$ есть мера скорости, с которой материал формы может поглощать теплоту. Этот параметр называют *коэффициентом аккумуляции теплоты*. Обозначим $v_{кр} = t_0 - t_n$, отношение $2/\sqrt{\pi} = 1,13$. Таким образом, толщина слоя затвердевающей отливки при ее охлаждении в песчаной форме будет изменяться по закону квадратного корня:

$$x = [1,13 b_\phi v_{кр} / (\rho_0 L)] \sqrt{\tau}. \quad (6)$$

В реальных условиях расплав попадает в литейную форму перегретым относительно температуры ликвидуса $t_{л}$, поэтому необходимо учесть время охлаждения расплава от начальной температуры t_n до $t_{л}$. Рассчитав тепловой поток в литейную форму при охлаждении расплава от t_n до $t_{л}$, Г. Ф. Баландин получил следующее выражение для расчета времени отвода в форму теплоты перегрева:

$$\tau_1 = \left[\frac{c_0 \rho_0 (t_n - t_{л}) R}{1,13 b_\phi (t_n - t_{н. \phi})} + \sqrt{\tau_{зал}} \right]^2, \quad (7)$$

где R — приведенный размер тела; $\tau_{зал}$ — время заливки расплава в литейную форму; $t_{н. \phi}$ — начальная температура формы.

Начальная температура расплава при охлаждении $t_n = (t_{зал} + t_{л})/2$, где $t_{зал}$ — температура сплава при заливке в форму. Для случая, когда температурный перепад внутри отливки равен нулю и геометрические размеры тела не играют существенной роли, можно воспользоваться приведенным размером тела

$$R = V_0 / F_0, \quad (8)$$

где V_0 — объем отливки.

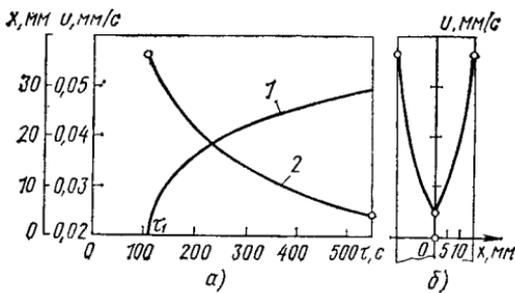


Рис. 5. Изменение слоя твердого металла и скорости затвердевания сплава отливки в песчаной форме

Время затвердевания отливки в песчаной форме с учетом времени отвода теплоты перегрева равно

$$\tau = [L\rho_0 R / (1,13b_\phi v_{кр}) + \sqrt{\tau_1}]^2. \quad (9)$$

При $\tau \geq \tau_1$ линейная скорость затвердевания u определяется по формуле

$$u = \frac{dx}{d\tau} = (b_\phi v_{кр}) / (L\rho_0 \sqrt{\pi\tau}). \quad (10)$$

В качестве примера на рис. 5 приведены результаты расчета затвердевания в песчаной форме чугуна отливки массой 420 кг коробчатой формы (стол фрезерного станка) со средней толщиной стенки 30 мм. При проведении расчетов отливку представляли в виде плоской плиты. После отвода от расплава теплоты перегрева начинается рост твердой корки в соответствии с законом квадратного корня (рис. 5, а, кривая 1). Линейная скорость затвердевания сплава со временем плавно снижается (рис. 5, а, кривая 2). Это значит, что скорость затвердевания по толщине отливки неодинакова, в центральной зоне плоской отливки она существенно уменьшается (рис. 5, б).

Отливки сложной конфигурации можно рассматривать как состоящие из плоских, цилиндрических и сферических частей со своим значением приведенного размера R . В отличие от плоских в цилиндрических и шаровых отливках линейная скорость затвердевания к концу процесса не уменьшается, а увеличивается, что связано с изменением соотношения объема затвердевающего металла и поверхности охлаждения.

Кроме объемных песчаных форм, для изготовления отливок используют песчаные (керамические) оболочковые и металлические формы. На рабочую поверхность металлических форм в большинстве случаев наносят слой огнеупорного покрытия, являющийся термическим сопротивлением.

Закономерности затвердевания отливок в объемных песчаных формах справедливы и для форм других типов, в том числе металлических со слоем теплоизолирующего покрытия. В этом случае коэффициент затвердевания будет определяться не способностью формы отводить теплоту от отливки (b_ϕ), а свойствами затверде-

вающего металла проводить теплоту от центра к поверхности (λ_0/l_0) и передавать ее форме (α).

Лишь в случае использования тонкостенных водоохлаждаемых металлических форм (без слоя покрытия) для получения тонкостенных отливок толщина слоя затвердевающего металла изменяется со временем линейно, а скорость затвердевания становится постоянной.

§ 2. УСЛОВИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ СПЛАВОВ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ ОТЛИВОК

По мере того как в той или иной части охлаждающейся отливки создаются условия для осуществления фазового перехода из жидкого состояния в твердое, в соответствующем месте этой отливки начинается процесс кристаллизации, приводящий к формированию твердых кристаллов. Так как при затвердевании отливок происходит кристаллизация сплавов, рассмотрим энергетические и кинетические закономерности этого процесса.

Процесс кристаллизации развивается в соответствии с общими законами термодинамики. В изолированной системе самопроизвольно протекают только те процессы, которые приводят к уменьшению свободной энергии системы (энергии Гиббса) $\Delta G = G_R - G_N \leq 0$, где G_R и G_N — свободная энергия системы соответственно в конечном и начальном состояниях. В реальных условиях металлы и сплавы переохлаждаются до начала кристаллизации. Чем выше степень переохлаждения (Δt), тем больше уменьшение энергии Гиббса и, следовательно, больше движущая сила перехода металла из жидкого состояния в твердое.

Расплавленные металлы практически никогда не являются гомогенными (однородными) жидкостями, в них всегда присутствуют тугоплавкие дисперсные частицы, которые участвуют в процессе кристаллизации.

Однако для установления закономерностей процесса сначала рассмотрим кристаллизацию *гомогенного металла* — металла, в котором отсутствуют готовые поверхности раздела.

Кристаллизация металлов осуществляется в результате образования кристаллических зародышей, вырастающих затем в зерна или кристаллы. Спонтанно (самопроизвольно) возникающие центры кристаллизации (зародыши) приводят к уменьшению объемной свободной энергии (G_V) и увеличению межфазной энергии (G_F) за счет появления поверхностей раздела.

Для развития процесса кристаллизации необходимо увеличение поверхностной энергии компенсировать уменьшением объемной свободной энергии. Общее изменение энергии Гиббса в результате формирования твердой частицы сферической формы радиуса r

$$\Delta G = G_V + G_F = -L\rho_0 \frac{\Delta t}{t_{пл}} \frac{4}{3} \pi r^3 + 4\pi r^2 \sigma_{т-ж},$$

где $\sigma_{т-ж}$ — межфазная энергия на границе твердой и жидкой фаз.

Зародыш может сохраниться, если ΔG при данном переохлаждении начнет уменьшаться. Для малой частицы отношение поверхности к объему слишком велико, чтобы удовлетворить этому условию. Но при определенном размере зародыша, который назван критическим ($r_{кр}$), ΔG начинает уменьшаться. Зародыши, размеры которых больше $r_{кр}$, способны к существованию, так как они растут с уменьшением энергии. Критический размер зародыша можно определить при условии $|dG/dr| = 0$:

$$r_{кр} = 2\sigma_{т-ж}t_{пл}/(L\rho\Delta t), \quad (11)$$

здесь $t_{пл}$ — температура плавления металла.

Из уравнения (11) следует, что критический размер зародыша будет тем меньше, чем меньше межфазное натяжение и больше переохлаждение.

Для образования кристаллических зародышей в жидкости требуются определенные условия. Необходимо, чтобы в расплаве возникли такие микрообъемы,

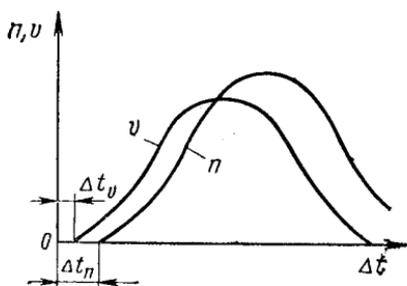


Рис. 6. Влияние переохлаждения на изменение скорости возникновения зародышей и линейной скорости роста кристаллов

в которых взаиморасположение атомов соответствовало бы кристаллической решетке твердого сплава. Такие микрообъемы действительно образуются в расплаве за счет неравномерного распределения энергии внутри жидкости.

Не следует считать, что зародышами являются микрогруппировки — *кластеры*, которые образуются в жидкости при температуре выше $t_{пл}$. Кластеры, даже весьма устойчивые во времени, характеризуют структуру самой жидкости, вследствие чего они не могут быть квалифицированы как представители иной фазы. Кластеры не имеют физической поверхности раздела, при переходе через которую параметры состояния менялись бы скачкообразно.

Кристаллизация гомогенных металлов характеризуется двумя параметрами: скоростью возникновения зародышей (n) и линейной скоростью роста кристаллов (v), что говорит о двух стадиях процесса кристаллизации (рис. 6). Гомогенный металл, охлажденный ниже $t_{пл}$, остается тем не менее жидким. Это состояние, являющееся устойчивым, но не равновесным, принято называть *метастабильным*. Как видно из рисунка, интервал метастабильности роста Δt_v существенно меньше интервала метастабильности зарождения Δt_n , так как работа образования зародыша больше работы увеличения поверхности раздела твердой и жидкой фаз. Следовательно, спонтанная кристаллизация начинается лишь при достижении значительного переохлаждения, соответствующего Δt_n , при котором образуются жизнеспособные зародыши. Для их дальнейшего роста не требуется дополнительной энергии, так как достигнутая степень переохлаждения значительно выше Δt_v .

Переохлаждение, необходимое для начала кристаллизации гомогенных металлов, весьма велико и достигает $0,2t_{пл}$.

При кристаллизации *реальных расплавленных металлов*, являющихся гетерогенными жидкостями из-за наличия в них большого количества твердых неметаллических дисперсных частиц, переохлаждение составляет $1-10^\circ\text{C}$. По наличию этих частиц металлические расплавы иногда относят к полидисперсным коллоидным системам. Процесс кристаллизации реальных металлов и сплавов существенно облегчается в присутствии в объеме жидкости твердых подложек — инициаторов зарождения твердой фазы. Однако и в этом случае формальным условием начала кристаллизации является достижение зародышами размеров более критических, т. е. их поверхность должна обеспечить уменьшение энергии Гиббса.

Различие кристаллизаций гомогенных и гетерогенных металлов заключается в том, что в первом случае межфазная граница образуется только между твердой (кристаллизующейся) и жидкой фазами, а во втором возникают две межфазные поверхности: одна между твердой и жидкой фазами, а вторая между кристаллизующейся фазой и твердой подложкой. Вместе с тем известно, что межфазная энергия на границе двух твердых сред ($\sigma_{т-п}$) намного меньше межфазной энергии на границе твердой и жидкой фаз ($\sigma_{т-ж}$). Следовательно, при наличии подложки поверхностная свободная энергия возрастает медленнее, что свидетельствует о возможности начала кристаллизации при меньшем переохлаждении. Чем меньше значение $\sigma_{т-п}$, тем энергетически более выгоден процесс кристаллизации на подложке. П. Д. Данков показал, что минимальное значение межфазной энергии на границе кристаллизующаяся фаза — подложка соответствует условию идентичности кристаллических решеток подложки и зародыша. С увеличением переохлаждения кристаллизация может развиваться на подложках с заметно отличающимися параметрами решетки по сравнению с кристаллизующимся металлом. Таким образом, возрастает число работоспособных под-

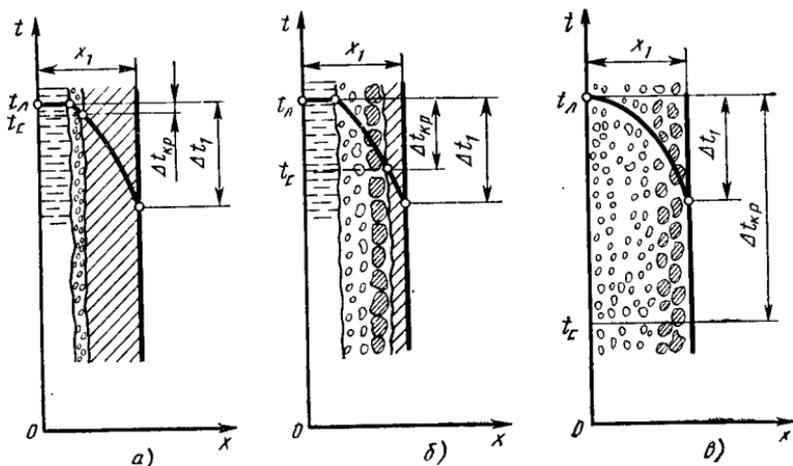


Рис. 7. Схемы процессов затвердевания сплава отливки:

а — последовательное; б — последовательное с двухфазной зоной; в — объемное

Рост кристаллов на изоморфных подложках начнется при переохлаждении, которое превышает Δt_p , но существенно меньшем Δt_{II} . При этом на поверхности подложек появляется слой кристаллизующейся фазы, и дальнейшая кристаллизация возможна при меньшем переохлаждении.

Твердые дисперсные частицы, существенно отличающиеся по параметрам кристаллических решеток от кристаллизующейся фазы, при определенных условиях могут активироваться и стать центрами зарождения кристаллов — подложками. Активация частиц происходит при выдержке твердого металла, в период которой по границе частица — металл возникает высокое межфазное натяжение. Оно тем больше, чем больше различие кристаллического строения контактирующих сред. В. И. Данилов установил, что из-за большой поверхностной энергии на этих межфазных границах система переходит в неравновесное состояние, которое постепенно снимается за счет перемещения поверхностных атомов контактирующих сред и перестройки поверхностного слоя частиц. В результате между металлом и дисперсной частицей образуется промежуточный слой, кристаллическое строение которого на границе с металлом приближается к строению последнего.

При значительном перегреве расплава над температурой кристаллизации активированные дисперсные частицы дезактивируются, так как при высоких температурах изоморфный поверхностный слой подложки разрушается.

В зависимости от положения сплава на диаграмме состояния и интенсивности теплообмена в системе отливка — форма механизмы затвердевания отливок из чистого металла и сплава могут существенно различаться. Затвердевание чистых металлов и сплавов эвтектического состава протекает последовательно, начиная от поверхности контакта с формой, где расплав прежде всего достигает температуры кристаллизации, до центра отливки на глубину x_1 (рис. 7, а). Последовательное затвердевание реализуется и для сплавов с интервалом кристаллизации $\Delta t_{кр}$, если $\Delta t_{кр} = t_{II} - t_c$ (где t_c — температура солидуса) и перепад температур по толщине стенки отливки Δt_1 отличаются незначительно (рис. 7, б):

$$\Delta t_{кр} / (\Delta t_1) \approx 1.$$

Но в этом случае перед фронтом твердой корки металла образуется двухфазная зона. Объемное затвердевание отливок из сплавов типа твердых растворов (рис. 7, в) возможно лишь при условии $\Delta t_{кр} / (\Delta t_1) \gg 1$.

Как показали исследования Н. Г. Гиршовича и Г. Ф. Баландина, в реальных условиях кинетика кристаллизации определяется не ее параметрами, а теплоот-

водом, к которому эти параметры «приспосабливаются». Инструментом «приспособления» кристаллизации к теплоотводу служит переохлаждение. Сопоставим кинетику теплоотвода и кинетику кристаллизации.

Ранее при выводе уравнения скорости затвердевания отливки в песчаной форме считали, что количество теплоты Q , поступающей в форму, зависит только от теплоты кристаллизации. Этот вывод вытекал из допущения об отсутствии температурного перепада по телу отливки и температурного напора на границе металл — форма. На самом деле общий баланс теплоты без учета потерь

$$v_Q = v_{\Delta t} + (V_0 \rho_0 c_0) \frac{d(\Delta t)}{dt},$$

где $v_Q = dQ/dt$ — скорость теплоотвода; $v_{\Delta t} = (L \rho_0) dV_{з.ф.}/dt$ — скорость кристаллизации; $V_{з.ф.}$ — объем закристаллизовавшейся фазы.

Так как $v_Q \neq v_{\Delta t}$, переохлаждение всегда должно изменяться во времени. Поэтому даже после снижения переохлаждения до малого, часто трудно фиксируемого значения, оно не только существует, но и обязательно изменяется во времени. Параметры кристаллизации (n и v) всегда соответствуют имеющемуся в данный момент переохлаждению или стремятся к этому.

Это в одинаковой степени справедливо как для объемного, так и для последовательного затвердевания. В последнем случае можно принять, что перед фронтом затвердевающего металла находится зона зарождения центров кристаллизации и их роста. Кинетика кристаллизации в этом случае зависит только от переохлаждения. Процесс начинается в момент τ_1 при достижении расплавом переохлаждения Δt_1 , которое определяет соответствующую скорость изотермической кристаллизации $v_{\Delta t_1}$ при постоянной температуре (рис. 8). Однако в этот момент $v_Q > v_{\Delta t_1}$, значит, переохлаждение должно увеличиваться и в соответствии с этим возрастать $v_{\Delta t}$ (отрезок AB). В момент времени, когда переохлаждение достигает максимального значения Δt_2 , скорость теплоотвода v_Q и скорость кристаллизации $v_{\Delta t}$ выравниваются. Скорость кристаллизации не может значительно превосходить скорость теплоотвода, так как это приведет к отводу теплоты не только через

твердую фазу, но и через расплав, т. е. к уменьшению переохлаждения, а это, в свою очередь, вызовет снижение скорости кристаллизации. При снижении скорости теплоотвода переохлаждение продолжает уменьшаться, и процесс заканчивается при каком-то переохлаждении Δt_k , которому соответствует скорость кристаллизации $v_{\Delta t_k}$.

Принципиальное значение имеет влияние толщины стенки отливки на скорость затвердевания и формирование структуры. Не случайно в формуле (10) указывается область определения скорости затвердевания. Затвердевание начинается только после отвода от расплава теплоты перегрева, т. е. в момент $\tau = \tau_1$, а τ_1 прямо пропорционально квадрату приведенного размера отливки. Поэтому при одинаковом перегреве расплавов выше температуры начала кристаллизации тонкостенные отливки затвердевают с большей скоростью. При последо-

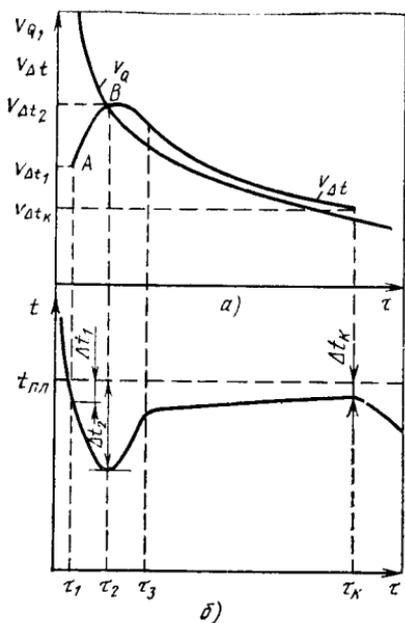


Рис. 8. Изменение во времени скоростей теплоотвода и кристаллизации (а), а также переохлаждения (б)

вательном затвердевании формирование твердой корки происходит в результате зарождения и роста кристаллов в тонком поверхностном слое отливки, испытывающем максимальное переохлаждение.

§ 3. ФОРМИРОВАНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ СПЛАВОВ ОТЛИВОК

Условия протекания кристаллизации определяют структуру сплава и отливки. В общем случае макроструктура отливки или слитка состоит из трех структурных зон: наружной из мелких зерен, промежуточной из столбчатых кристаллов и центральной из равноосных кристаллов. Кристаллическое строение отливки определяется многими факторами, связанными как с процессом образования зародышей, так и со свойствами сплава и формы. В зависимости от условий кристаллизации кристаллы растут с различными скоростями, что, в свою очередь, должно отражаться на форме отдельных кристаллов и в морфологии фронта их роста.

Объем твердой фазы пропорционален выделяющейся теплоте кристаллизации, а ее поверхность F будет определяться следующим выражением, полученным И. Б. Куманиным:

$$F = (L \Delta t M) / (n t_{\Sigma} \sigma_{Т-ж}), \quad (12)$$

где M — масса твердой фазы; n — коэффициент, учитывающий плотность дислокаций на поверхности кристалла, $n = 1, 2 \div 2, 3$.

Увеличение поверхности твердой фазы может происходить в результате появления новых кристаллов (увеличения числа центров кристаллизации) или разветвления имеющихся кристаллов.

С увеличением переохлаждения увеличивается суммарная поверхность растущих кристаллов. Это значит, что F растет с повышением скорости охлаждения, и в сплаве, затвердевающем в металлической форме, поверхность кристаллов будет больше, чем в сплаве, затвердевающем в песчаной форме.

Поверхность кристаллов увеличивается с уменьшением межфазного натяжения на границе с жидкостью, которое тем меньше, чем ближе состав жидкости к составу твердого тела. Таким образом, чистые металлы должны обладать склонностью к разветвлению кристаллов, т. е. формированию дендритов. Сплавы с широким интервалом кристаллизации по горизонтали не склонны к дендритной кристаллизации из-за большого различия свойств жидкой и твердой фаз.

Переохлаждение, возникающее в реальных условиях, почти всегда создает условия для искажения кристаллов, деформация которых поддерживает подвижное равновесие между $v_{\Delta t}$ и v_Q (см. рис. 8).

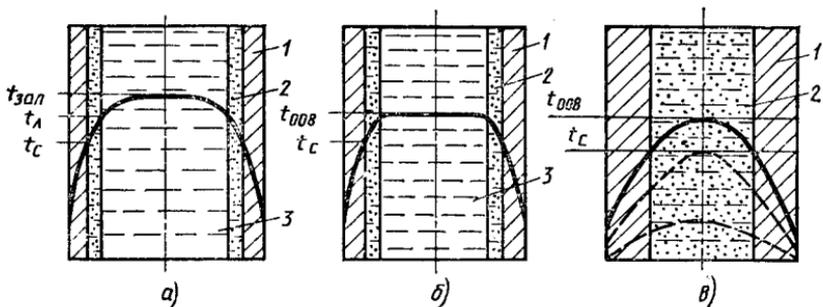


Рис. 9. Изменение температуры металла по сечению отливки на I (а), III (б) и IV (в) стадиях процесса формирования структуры

И. Б. Куманин предложил разбить процесс формирования структуры отливки на пять стадий:

I стадия протекает в период заливки литейной формы и в первые моменты после ее окончания. Значение коэффициента теплоотдачи $\alpha = b_0 / \sqrt{\pi \tau}$ очень большое ($\tau \rightarrow 0$; $\alpha \rightarrow \infty$), поэтому в тонком поверхностном слое отливки температура резко понижается, в то время как практически во всех остальных слоях сохраняется температура перегрева (рис. 9, а). На границе контакта с формой образуется тонкая твердая корка 1, а также очень тонкий слой твердожидкого сплава — двухфазная область 2. В центральной части отливки сохраняется область жидкого сплава 3.

Кристаллы в этом слое растут в условиях высокой степени переохлаждения, что приводит к образованию большого числа центров кристаллизации за счет возникновения зародышей как на подложках, так и без них. Появление большого числа зародышей вызывает интенсивный рост суммарной поверхности кристаллов. Одновременный рост многих кристаллов в этой зоне происходит в условиях взаимной конкуренции, что приводит к формированию мелкозернистой макроструктуры. Мелкие равновесные кристаллы, образующиеся в поверхностном слое отливки, называют замороженными кристаллами. Большая скорость отвода теплоты, в том числе теплоты кристаллизации, предопределяет разветвленное строение кристаллов, деформирующихся в этих условиях. Это приводит к тому, что микроструктура мелких зерен, как правило, характеризуется дендритным строением.

II стадия процесса затвердевания протекает после образования твердой корки в поверхностном слое, когда возрастает сопротивление отводу теплоты от расплава к форме. В этот период происходит выравнивание температур поверхностного и центральных слоев за счет конвекции расплава. Это может привести к полному или частичному расплавлению образовавшейся твердой корки.

Затвердевание на этой стадии идет до тех пор, пока в центральной зоне продолжается конвекция, выравнивающая температуру расплава.

III стадия процесса затвердевания отливки начинается в тот момент, когда скорость передачи теплоты от центральной зоны к форме или к сохранившейся твердой корке резко уменьшается. Это происходит, когда конвективное перемешивание расплава прекращается в результате повышения его вязкости. В начале этой стадии у поверхности формы или на сохранившейся твердой корке начинается нарастание твердой фазы и все сечение отливки имеет температуру не выше t_{008} (рис. 9, б), при которой в расплаве уже образуется $\sim 8\%$ твердой фазы. Твердая фаза может попасть во внутренние слои расплава вследствие различных причин: за счет опускания кристаллов с поверхности расплава ($\rho_T > \rho_{ж}$); в результате отделения дендритных ветвей от боковых поверхностей и их размножения; за счет появления и роста зародышей при понижении температуры, особенно при наличии гетерогенных центров кристаллизации. Температура t_{008} для данного сплава определяется по диаграмме состояния.

В соответствии с законом А. Эйнштейна вязкость жидкости увеличивается лавинообразно при возрастании в ней суспензированных твердых частиц до 8% .

Необходимо отметить, что жидкость при t_{008} не будет переохлаждена. III стадия закончится тогда, когда процесс теплообмена теплопередачей достигнет центра отливки. На этой стадии одновременно могут существовать твердая корка 1, двухфазная область 2 и область подвижного жидкого сплава 3, содержащего лишь ограниченное число твердых частиц.

С точки зрения формирования структуры именно на III стадии происходит рост столбчатых кристаллов из наружной зоны, причем расти продолжают только те кристаллы, которые благоприятно ориентированы относительно теплового потока. Поверхность раздела между столбчатыми кристаллами и жидкостью может быть гладкой, ячеистой или ячеисто-дендритной в соответствии с составом сплава и скоростью затвердевания. Развитие столбчатых кристаллов объясняется многими причинами. Во-первых, наибольшее переохлаждение жидкости возникает у граней кристаллов, обращенных к центру отливки, а не в направлении к поверхностям рядом растущих кристаллов. Во-вторых, только их передние концы непосредственно контактируют с исходной жидкостью, а боковые поверхности соприкасаются с жидкостью уже измененного за счет ликвации ряда элементов состава. Накопление ликвирующих элементов в жидкости, находящейся между растущими кристаллами, задерживает рост боковых поверхностей кристаллов. Кроме того, в исходной жидкости не содержится твердой фазы, рост которой происходил бы одновременно с ростом столбчатых кристаллов, т. е. отсутствует препятствие их росту со стороны жидкости.

При увеличении скорости роста столбчатых кристаллов, когда их вершины далеко выдвигаются в расплав, на локальных участках их боковых поверхностей, контактирующих с жидкостью с наименьшей ликвацией растворенного вещества, начинают расти боковые ветви кристаллов, т. е. формируется дендрит. Ветви дендрита, растущие в направлении, противоположном теплоотводу, считаются его *первичными (главными) осями*, а расположенные перпендикулярно им — *вторичными осями*. На вторичных осях дендрита в свою очередь могут начать расти ветви третьего порядка.

IV стадия начинается после того, как температура во всех слоях отливки и даже в ее центре станет ниже t_{008} (рис. 9, в). На этой стадии по сечению отливки существует лишь область твердого сплава 1 и двухфазная область 2. Происходит не только снижение температуры, но и уменьшение кривизны температурных кривых; они становятся более пологими. Это соответствует условию, при котором центр отливки охлаждается быстрее, чем периферия. Интенсивность теплоотвода от отливки снижается, температурные перепады по сечению отливки уменьшаются.

IV стадия заканчивается, когда центр отливки охлаждается до температуры t_c . Зона твердожидкого металла исчезает. Как уже неоднократно было показано, дендритный рост твердой фазы определяется высокой скоростью кристаллизации (теплоотвода). Когда в твердожидком состоянии остается лишь центральная зона отливки, скорость теплоотвода в результате увеличения теплового сопротивления затвердевшего металла и нагрева формы существенно снижается. Переохлаждение расплава у вершин дендритов уменьшается, их разветвление прекращается. Часть ветвей оплавляется и падает в жидкую фазу. Кроме того, при кристаллизации сплавов центральная зона отливки может обогащаться некоторыми тугоплавкими компонентами. При замедлении охлаждения может наступить такой момент, когда переохлаждение распространится за фронт кристаллизации в центральную часть отливки, где жидкость более тугоплавка. Это явление называется *концентрационным переохлаждением*. Все это приводит к тому, что в центральной зоне отливки начинают формироваться крупные равноосные зерна. Однако в крупнозернистых кристаллитах выявляется внутренняя микроструктура, весьма сходная с дендритной, но не имеющая ориентации в направлении теплового потока.

Стадия V процесса соответствует периоду охлаждения твердого сплава до нормальной температуры (20 °C). В этот период может происходить вторичная кристаллизация и окончательно формироваться структура сплава отливок.

Различают две группы добавок, которые могут оказывать влияние на образующуюся структуру сплавов: растворимые в расплаве и нерастворимые в нем.

Растворимые добавки — *модификаторы I рода* являются поверхностно-активными веществами по отношению к кристалли-

зующейся фазе. Адсорбируясь на гранях растущих кристаллов, они снижают межфазное натяжение на границе кристалл—жидкость, что приводит к уменьшению свободной энергии системы. Уменьшение $\sigma_{т-ж}$ приводит к уменьшению $r_{кр}$ [см. формулу (11)]. Следовательно, зародыши критического размера могут образовываться при меньшем переохлаждении, сокращается интервал метастабильности, создаются условия для увеличения центров кристаллизации. Введение поверхностно-активных веществ, уменьшающих $\sigma_{т-ж}$ в соответствии с закономерностью, установленной И. Б. Куманиным [см. формулу (12)], должно приводить к увеличению суммарной поверхности растущих кристаллов. Это условие реализуется за счет роста большого числа мелких кристаллов.

О возможном влиянии поверхностно-активных веществ на кристаллизацию сплавов можно судить по изменению поверхностной энергии жидких сплавов при вводе примесей в малых количествах. Известно, что при введении 0,01 % Na в силумин поверхностное натяжение сплава при 700 °С уменьшается от 800 до 625 МДж/м², а при введении 0,12 % В в легированную хромистую сталь ее поверхностное натяжение при 1500 °С снижается от 1380 до 1200 МДж/м².

Как правило, модификаторы I рода, хорошо растворимые в жидких сплавах, практически не растворяются в твердых растворах и их атомы не принимают участия в построении решетки кристаллизующейся фазы. Модификаторы, оттесняемые в жидкость или адсорбирующиеся на гранях растущих кристаллов, будут затруднять переход атомов кристаллизующегося вещества из жидкой фазы в твердую.

Модификаторы I рода влияют на микроструктуру сплавов, изменяя дисперсность, форму отдельных структурных составляющих. Наибольшее влияние их проявляется при введении в сплавы, кристаллизующиеся с образованием эвтектики.

В практике литейного производства широко распространено модифицирование силуминов (сплавов системы Al—Si) такими поверхностно-активными добавками, как Na, Li, K, Sr, P чугуна — Mg, Y, Ce, стали — В, редкоземельными металлами (РЗМ).

Нерастворимые вещества, удовлетворяющие принципу структурного соответствия с кристаллизующейся фазой, являются *модификаторами II рода*. Модификаторы II рода должны быть дисперсными тугоплавкими частицами, при введении которых в жидкости сразу же создается развитая поверхность раздела, облегчающая образование твердой фазы при кристаллизации. В отличие от модификаторов I рода модификаторы II рода чаще всего влияют на макроструктуру, прежде всего на размер зерна. Наиболее сильно они воздействуют на чистые металлы, уменьшая зону столбчатой структуры.

Модификаторами II рода являются высокодисперсные тугоплавкие оксидные, карбидные, нитридные частицы. Однако их

трудно ввести и равномерно распределить в расплаве, поэтому в литейном производстве нашли применение такие добавки, которые образуют в сплавах тугоплавкие частицы, выполняющие роль модификаторов II рода.

Известно влияние добавок Ti на величину зерна алюминиевых сплавов, добавок Fe и C на величину зерна магниевых сплавов, добавок В и Zr на величину зерна никелевых сплавов.

§ 4. УСАДКА СПЛАВОВ, ФОРМИРОВАНИЕ УСАДОЧНЫХ РАКОВИН И ПОР В ОТЛИВКАХ

Охлаждение жидкого сплава, его кристаллизация и последующее охлаждение в твердом состоянии сопровождаются уменьшением объема или его *усадкой*, количественной мерой которой являются коэффициенты термического сжатия. С усадкой связано возникновение в отливках пустот в виде раковин и пор, внутренних напряжений и трещин, зазора между отливкой и поверхностью формы. На конечные размеры отливки влияет изменение объема твердого металла в результате различных фазовых превращений.

Общее относительное уменьшение объема жидких сплавов в интервале от $t_{\text{зал}}$ до $t_{\text{л}}$ определяет усадку в жидком состоянии, которая зависит от значения коэффициента термического сжатия $\beta_{\text{ж}}$ и температурного интервала,

$$\epsilon_{\text{ж}} = \frac{\Delta V}{V_0} = \frac{V_0 - V_0 [1 - \beta_{\text{ж}} (t_{\text{зал}} - t_{\text{л}})]}{V_0} = \beta_{\text{ж}} (t_{\text{зал}} - t_{\text{л}}),$$

где ΔV — изменение объема сплава при охлаждении от $t_{\text{зал}}$ до $t_{\text{л}}$; V_0 — начальный объем сплава при $t_{\text{зал}}$.

Коэффициент $\beta_{\text{кр}}$ объемного термического сжатия при кристаллизации чистых металлов или эвтектических сплавов характеризует относительное уменьшение их объема при постоянной температуре, поэтому

$$\epsilon_{\text{кр}} = \beta_{\text{кр}} = (V'_{\text{ж}} - V'_{\text{т}}) / V'_{\text{ж}},$$

где $V'_{\text{ж}}$, $V'_{\text{т}}$ — объем сплава при $t_{\text{пл}}$ соответственно в жидком и твердом состояниях.

Коэффициенты усадки сплавов, затвердевающих в интервале температур, определяют аналогично $\epsilon_{\text{ж}}$:

$$\epsilon_{\text{кр}} = \beta_{\text{кр}} (t_{\text{л}} - t_{\text{с}}).$$

Значения температурных коэффициентов объемного сжатия в жидком состоянии и при кристаллизации ряда металлов — основ важнейших литейных сплавов представлены в табл. 4.

Снижение температуры сплава от $t_{\text{зал}}$ до $t_{\text{л}}$ сопровождается понижением уровня расплава за счет уменьшения его объема. Наибольшее значение при формировании отливок имеет изменение

Таблица 4

Коэффициенты объемного сжатия металлов		
Металл	$\beta_{ж} \cdot 10^3,$ $1/^\circ\text{C}$	$\beta_{кр}$
Al	40	0,066
Mg	35	0,051
Cu	20	0,053
Fe	9	0,032
Ti	—	0,1

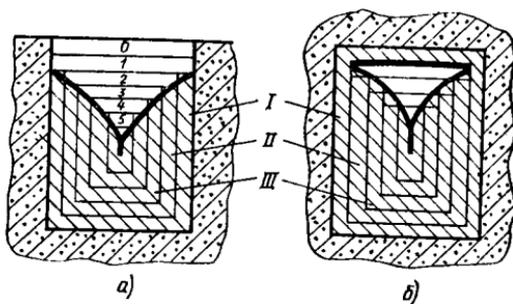


Рис. 10. Формирование усадочной раковины в отливке при различных условиях охлаждения

объема сплава при кристаллизации, $\beta_{кр}$ достигает у ряда сплавов $\sim 10\%$.

Большинство литейных сплавов характеризуется большим удельным объемом в жидком состоянии, чем в твердом. Если бы во время формирования отливки в литейной форме уменьшение объема происходило во всех ее частях одновременно, то следствием усадки было бы только уменьшение размеров. В реальных условиях затвердевание различных частей отливки происходит неравномерно. Когда наружные слои затвердеют и изменят объем и размеры, во внутренних зонах еще находится жидкий сплав, который должен претерпеть значительно большую усадку по сравнению с затвердевшими слоями. После окончания охлаждения окажется, что объем внутренней части отливки уменьшился больше, чем объем, ограниченный внешними контурами всей отливки. Внутри отливки окажутся усадочные полости, не заполненные металлом. В ходе затвердевания отливки объемная усадка проявляется в виде крупных пустот — *усадочных раковин* и многочисленных мелких пор — *усадочной пористости*.

Рассмотрим механизм образования сосредоточенной усадочной раковины в простой цилиндрической отливке при ее охлаждении с трех и четырех сторон (рис. 10).

В первом случае при охлаждении перегретого выше $t_{л}$ расплава уменьшение объема выразится в понижении уровня с 0 до 1 (рис. 10, а). Чем выше начальная температура расплава, тем значительнее понижение уровня. Если считать, что теплота отводится только стенками формы, то через некоторое время около них образуется твердая корка I. Вследствие того, что объем твердой фазы меньше объема затраченной на ее образование жидкости, уровень расплава в незатвердевшей части понизится до 2. Затем идет следующий этап затвердевания с образованием твердого слоя II и понижением уровня расплава до 3. При росте слоя III уровень расплава понижается до 4. Таким образом, начинает возникать усадочная раковина. В действительности процессы затвердевания и понижения уровня протекают непрерывно, поэтому на

поверхности раковины не образуются ступеньки. Сосредоточенная усадочная раковина имеет вид конуса.

Если охлаждение аналогичной отливки идет с четырех сторон (рис. 10, б), то вначале образуется твердый слой I по всему контуру формы. При затвердевании слоя II происходит снижение уровня расплава, и он отходит от верхней корки с образованием зазора. Это приводит к уменьшению теплоотвода через верхнюю поверхность. Дальнейший ход образования усадочной раковины не отличается от рассмотренного выше.

Отливки с усадочными раковинами в сечении в большинстве случаев непригодны для использования, поэтому при их изготовлении стремятся вывести усадочную раковину в дополнительный объем, называемый *прибылью*. Плотное строение отливки может быть обеспечено лишь при осуществлении притока жидкости из прибыли. Естественно, что сплав в ней должен затвердевать в последнюю очередь.

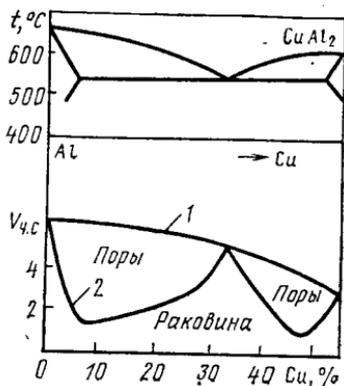
При изготовлении фасонных отливок со стенками различной толщины прибыли устанавливают над их *термическими узлами*, т. е. такими частями, которые, затвердевая последними, обеспечивают питание жидким сплавом более тонких стенок и сами по этой причине испытывают недостаток в металле для формирования плотного строения.

При последовательном затвердевании отливки в отсутствии двухфазной зоны, т. е. при условии $\Delta t_{кр}/(\Delta t_1) < 1$ (см. рис. 7), изменение объема металла в связи с нарастанием твердой корки компенсируется свободно текущим расплавом. В таких отливках усадка проявляется в виде концентрированной усадочной раковины.

Объемная усадка в отливках из сплавов с интервалом кристаллизации проявляется не только в виде раковины, но и в виде пористости. Как уже было показано, затвердевание отливок из подобных сплавов происходит с образованием двухфазной зоны, которая неоднородна по количеству выделившейся твердой фазы. Та часть двухфазной зоны, в которой находится 35—40 % твердых кристаллов, представляет собой непрерывный каркас из дендритов и может рассматриваться как капиллярно-пористое тело. С этого момента питание отливки определяется закономерностями проникновения жидкого металла в твердожидкую зону. Пока в центральной зоне отливки находится жидкий металл, компенсирование усадки ее затвердевающих частей происходит весьма интенсивно, даже при протяженности зоны в несколько десятков миллиметров.

Условия питания резко изменяются для сплава, находящегося в центральной части отливки. Двухфазная зона распространяется на все сечения отливки, зона жидкого расплава отсутствует, что соответствует IV стадии затвердевания отливки. Продолжающееся охлаждение вызывает кристаллизацию остаточной жидкости в межзональном пространстве дендритов. По окончании затвердевания

Рис. 11. Влияние интервала кристаллизации сплава на распределение объема $V_{ус}$ усадочных полостей между раковинами и порами:
 1 — общий объем усадочных полостей; 2 — объем усадочной раковины



почти вся центральная часть отливки оказывается пористой вследствие усадки жидкости, оставшейся между ветвями дендритов. Каждая пора представляет собой маленькую изолированную усадочную раковину неправильной формы. Таким образом, отливка из сплава с интервалом кристаллизации может быть поражена как усадочной раковинной в верхней части термического узла, так и пористостью, расположенной в центральной части отливки, часто непосредственно под раковинной. Суммарный объем раковины и пор составляет общую величину усадки, характерную для данного сплава (рис. 11). Чем шире двухфазная зона при затвердевании отливки, тем больший объем усадки приходится на поры. При малой скорости охлаждения (в сухих песчаных формах) двухфазная область может распространиться почти сразу на всю толщину отливки, поэтому пористость в этом случае образуется не только в центральной, но и в периферийных частях.

Устранение усадочной пористости в теле отливки — задача более сложная, чем выведение в прибыль концентрированной усадочной раковины. При изготовлении отливок из сплавов, склонных к образованию усадочных пор, необходимо не только устанавливать прибыли на термических узлах отливок, но и обеспечивать направленность и высокую интенсивность затвердевания в них сплава, чтобы уменьшить протяженность двухфазной зоны и тем самым обеспечить свободное питание центральной части отливки жидким сплавом из прибыли. Это обеспечивается выбором места подвода металла в полость литейной формы, установкой холодильников (чаще всего металлических вставок) в поверхностный слой формы, а также утеплением прибылей для уменьшения в них скорости затвердевания сплава.

§ 5. РАЗВИТИЕ ЛИКВАЦИИ В СПЛАВАХ ПРИ ЗАТВЕРДЕВАНИИ ОТЛИВОК

Большая часть литейных сплавов не позволяет получать отливки с однородным химическим составом. В них наблюдается ликвация (микроликвация и макроликвация) — неоднородность химического состава.

Микроликвация характеризует химическую неоднородность по сечению кристалла, зерна, поэтому часто ее называют *внутрикристаллической*. Микроликвация является следствием неравно-

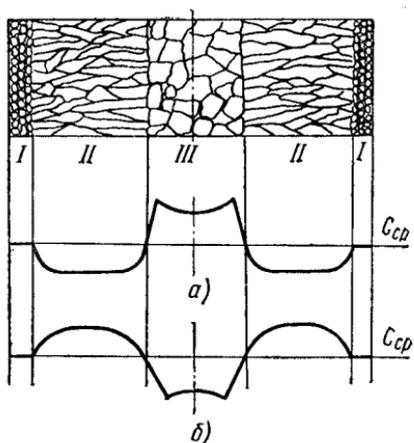


Рис. 12. Распределение ликвирующих элементов в зонах отливки при развитии прямой (а) и обратной (б) зональной ликвации (C_{cp} — концентрация ликвирующего элемента в исходном сплаве)

весной кристаллизации сплавов в реальных условиях формирования отливки. В интервале $t_{л}—t_c$ изменение состава твердой фазы характеризуется положением линии солидуса на диаграмме состояния. В условиях неравновесной кристаллизации диффузионные процессы, особенно в твердой фазе, не успевают полностью пройти и образовавшаяся твердая фаза имеет неоднородный, неравновесный состав. В большинстве случаев микроликвация может быть устранена высокотемпературным отжигом отливок.

Макроликвация проявляется в неоднородном составе поверхностных и центральных зон, верхних и нижних слоев отливки или слитка. Такую ликвацию называют *зональной*.

В крупных массивных отливках или слитках из сплавов с широким интервалом кристаллизации при медленном охлаждении часто наблюдается особый вид зональной ликвации, называемой конусом осаждения. В нижней части отливки или слитка находится сплав с пониженным содержанием легкоплавких компонентов, который образуется в результате осаждения твердых частиц, имеющих большую плотность по сравнению с жидкостью в период, когда этому процессу не препятствует конвекция. Это возможно только в тот период затвердевания, когда расплав потерял теплоту перегрева. Как было ранее показано, в центре отливки температура t_{008} поддерживается самое длительное время и, следовательно, оседание частиц здесь наиболее продолжительное. Поэтому зона неоднородного химического состава в данной части слитка имеет форму конуса с вершиной в центральной его части.

Наиболее типичное проявление зональной ликвации состоит в том, что в горизонтальном сечении отливки химический состав неодинаков. В зависимости от характера распределения ликвирующих компонентов сплава такую ликвацию называют прямой или обратной (рис. 12).

В поверхностных участках отливки содержание ликвирующего компонента соответствует его средней концентрации в сплаве. Зона I соответствует той части отливки, в которой образуются мелкие равноосные кристаллы. Большая скорость затвердевания поверхностных участков способствует кристаллизации жидкости среднего состава без вытеснения ликвирующих компонентов.

Зона II, в которой концентрация ликвирующего компонента ниже или выше средней, соответствует зоне отливки с развитыми дендритными кристаллами. Возникновение химической неоднородности вызвано характером кристаллизации и условиями питания во время усадки сплава. Как было показано, дендриты образуют твердый скелет с разветвленными межсосновыми промежутками. Двухфазная зона кристаллизующейся отливки в той части, где образовалось более 40 % твердой фазы в виде дендритов, представляет собой капиллярно-пористое тело. Часто столбчатые кристаллы обеднены некоторыми элементами сплава, которыми обогащается жидкая фаза. Эти элементы и являются ликвирующими. Как правило, обогащение жидкости ликвирующими элементами приводит к понижению температуры плавления, т. е. жидкость становится более подвижной по сравнению с раствором исходного (среднего) состава. В двухфазной зоне постоянно происходит перемещение жидкости под действием капиллярной силы и силы тяжести. В зависимости от состава жидкой фазы, занимающей промежутки между дендритами во II зоне отливки, возникает прямая или обратная ликвация.

Развитие прямой ликвации связано с обогащением ликвирующими элементами центральной зоны отливки. Это вызвано тем, что при дендритной кристаллизации в двухфазной зоне образуется очень легкоплавкая жидкость, которая будет концентрироваться в передней части этой зоны. Жидкость, обогащенная ликвирующими элементами, хуже, чем исходная жидкость среднего состава, смачивает образующиеся кристаллы. Поэтому можно предположить, что внутри капиллярно-пористого тела происходит перемещение жидкости: легкоплавкая жидкость вытесняется к передней границе двухфазной зоны, исходный расплав, наоборот, за счет капиллярных сил втягивается внутрь двухфазной зоны.

Как было замечено Б. Б. Гуляевым, жидкость, обогащенная ликвирующими элементами, отличается по плотности от исходного расплава, что приводит к ее перемещению вдоль фронта растущих кристаллов. Необходимо обратить внимание на тот факт, что концентрацию ликвирующих элементов определяют не в межсосновых промежутках дендритной структуры, а как среднюю в данной зоне отливки. Поэтому на содержание ликвирующих элементов в зоне II будут влиять форма и размеры растущих кристаллов. Если межсосновых промежутков из-за формирования малоразветвленных утолщенных столбчатых кристаллов будет мало, то даже при условии хорошей смачиваемости их жидкость будет вытесняться в центральную зону отливки. Низкое содержание ликвирующих элементов в кристаллах окажет преобладающее влияние на концентрацию их во всей структурной зоне.

Поскольку в конце III стадии затвердевания отливки температура в ее центральной части значительно понижается, перемещение жидкости, обогащенной ликвирующими элементами, замедляется. Это является причиной наибольшей концентрации их на

границе II и III зон отливки. Кроме того, в центральную часть отливки поступает исходный расплав для компенсации усадки, что приводит к некоторому уменьшению концентрации ликвирующихся элементов.

Развитие обратной ликвации связано с более интенсивным втягиванием в двухфазную зону жидкости, обогащенной ликвирующими элементами, что приводит к увеличению их концентрации во II зоне отливки. Естественно, что развитию обратной ликвации способствует уменьшение межфазного натяжения на границе растущих кристаллов и жидкостью, находящейся в межосных промежутках, а также сильная разветвленность дендритов в этой зоне. Для восполнения усадки сплава в двухфазной зоне в нее втягивается жидкость с передней границы, также обогащенная ликвирующими элементами. В зоне формирования равноосных кристаллов концентрация ликвирующихся элементов восполняется за счет исходного расплава из верхних слоев отливки или прибыли для питания центральной части отливки. Но большая часть ликвирующихся элементов в данном сечении отливки находится в зоне II, поэтому, несмотря на питание исходным расплавом, центральная часть отливки оказывается обедненной ликвирующими элементами. Если питание центральной части отливки было недостаточным и в ней образовалась усадочная пористость, то разница в концентрации ликвирующихся элементов II и III зон существенно повышается.

По мнению И. Б. Куманина, склонность к ликвации будут проявлять прежде всего те элементы, диаграммы состояния которых с основой сплава характеризуются широким интервалом кристаллизации по горизонтали. В этом случае жидкость двухфазной зоны по своему составу существенно отличается от среднего состава сплава. В стали, например, сильно выражена ликвация углерода, серы и фосфора, тогда как ликвация кремния и марганца не наблюдается. Сравнение диаграммы состояния железа с диаграммами данных элементов подтверждает высказанное положение. Кроме того, именно эти элементы имеют низкие коэффициенты равновесного распределения K_0 , определяемого отношением растворимости данного элемента в твердом и жидком железе:

Элемент	C	Mn	O	S	Si	Al	Cr
K_0	0,13	0,84	0,02	0,02	0,13	0,66	0,92

На развитие зональной ликвации влияет скорость охлаждения отливки. При объемном затвердевании, когда двухфазная область распространяется на всю толщину отливки, направленное перемещение жидкости замедляется и зональная ликвация выражена слабее. Такие условия могут наблюдаться при малых скоростях охлаждения, например в сухой песчаной форме. Образование в отливке четко ограниченных двухфазных областей при повышении скорости охлаждения обуславливает интенсивное движе-

ние жидкости и развитую зональную ликвацию, например в металлической форме. При получении отливок с высокими скоростями затвердевания ширина двухфазной зоны резко уменьшается и зональная ликвация не развивается, например при изготовлении тонкостенных отливок в водоохлаждаемых металлических формах.

§ 6. ГАЗОВЫЕ ДЕФЕКТЫ В ОТЛИВКАХ. ГАЗООБМЕН МЕЖДУ ОТЛИВКОЙ И ФОРМОЙ

Сплошность сплава в отливке может нарушаться не только усадочными раковинами и порами, но и газовыми дефектами. Различают два вида газовых дефектов: эндогенные, образующиеся при выделении газа из металла, и экзогенные, возникающие в результате проникания газов в отливку через ее поверхностный слой.

Вследствие того, что растворимость газов в металлах с понижением температуры существенно уменьшается, в период их кристаллизации и охлаждения начинается выделение газов. После заполнения литейной формы жидким металлом его затвердевание начинается у стенок формы, что препятствует удалению газов из центральных зон отливки, где и происходит образование газовых раковин. Этому способствует термодиффузия газа к центру отливки из-за значительного температурного градиента по сечению отливки. Если центральные зоны отливки сообщаются с прибылью, куда могут свободно выходить газы, то отливка будет плотной, даже при значительной концентрации газов в исходном жидком металле. В ряде случаев выделение газа из пересыщенного раствора происходит по всему сечению отливки, что приводит к образованию газовой пористости. Несмотря на высокую прочность металла, все же оказывается, что давление в газовых пузырьках может превысить его сопротивление, что приведет к возникновению мелких трещин.

В отдельных случаях газовые дефекты могут возникать за счет не только растворенных в металле газов, но и газов, образующихся в отливке при кристаллизации металла. Так, например, в стали, содержащей кислород, могут образовываться оксиды углерода в результате взаимодействия углерода с оксидами железа, выделяющимися из жидкого металла при кристаллизации твердого раствора.

Для предотвращения образования в отливках газовых дефектов необходимо обеспечивать минимально возможное содержание газов в жидких сплавах и создавать условия для удаления образующихся в отливках газов.

Газовые дефекты экзогенного характера являются частой причиной брака отливок и поэтому требуют специального изучения. Захват газов струей металла при заполнении формы возможен только при сильной турбулизации потока металла, что может

быть устранено изменением конструкции и размеров литниковой системы, места подвода металла.

Газы, содержащиеся в полости литейной формы, должны вытесняться заполняющим ее металлом во внешнюю атмосферу. Для этого предусматривают вертикальные каналы — выпоры, соединяющие полость формы с наружной средой. Эту роль могут выполнять открытые прибыли.

Труднее бороться с прониканием в отливку газов, образующихся на границе металл—песчаная форма. Я. И. Медведев установил, что в момент соприкосновения металла с песчаной формой (стержнем) возникает значительное газовое давление в зоне контакта (рис. 13), величина которого зависит прежде всего от температуры. Через некоторое время газовое давление в зоне контакта существенно снижается, а затем вновь повышается. Первоначальное повышение давления обусловлено несколькими причинами. Разовые песчаные формы являются пористыми телами, поры которых заполнены атмосферным воздухом (во влажных формах воздух насыщен водяными парами). Первой причиной повышения газового давления является расширение воздуха при его нагреве, причем расширение происходит в условиях ограниченного объема пор.

Второй причиной повышения является образование в форме дополнительного количества газообразных веществ. При использовании непросушенных форм и стержней основным источником газов является влага. В сухих литейных формах наибольшее количество газов образуется при сгорании, разложении и перегонке органических веществ, применяемых для придания формам и стержням прочности или специальных свойств. Возникновение газового давления в формах и стержнях определяется двумя взаимосвязанными процессами — объемной скоростью газообразования и объемной скоростью газоотвода.

Количество G (по массе) выделяющихся в формовочном материале газов подчиняется закону $G = m \sqrt{\tau}$, где m — коэффициент пропорциональности; τ — время.

Газотворная способность формовочных и стержневых смесей характеризуется коэффициентом удельного газовыделения Γ :

$\Gamma = G/Q_{\Phi}$, где Q_{Φ} — количество теплоты, поглощенное формой.

Коэффициент удельного газовыделения соответствует количеству (по массе) газа, выделяемого формой или стержнем при поглощении ими $4,19 \cdot 10^3$ Дж теплоты. Коэффициент Γ

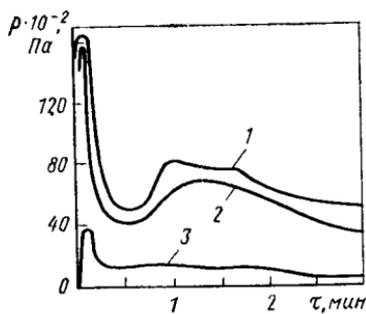


Рис. 13. Изменение во времени давления p газов у поверхности металла при заливке в песчаную форму:

1 — сталь; 2 — чугун; 3 — алюминий

смеси зависит от температуры заливаемого металла. При использовании высокотемпературных сплавов в поверхностном слое смеси газификации подвергаются практически все вещества, способные образовывать газы.

Способность формы отводить от поверхности отливки газы во внешнюю среду характеризуется коэффициентом K газопроницаемости. Можно принять, что движение газов по каналам пористой формы (стержня) при условии неразрывности установившегося потока подчиняется закону фильтрации Дарси. Установлено, что общий объем V газов, отводимых от поверхности металл—форма за время τ , составит

$$V = K (P_1 - P_2) F_{\phi} \tau / l_{\phi}, \quad (13)$$

где P_1 и P_2 — давление газа соответственно в начальном и конечном сечениях канала; F_{ϕ} — поперечное сечение формы; l_{ϕ} — толщина стенки формы.

Формулу (13) используют для определения коэффициента газопроницаемости при продувке воздуха через изготовленный из опытной смеси образец.

Экспериментальное определение коэффициентов Γ и K дает возможность оценить избыточное газовое давление P_{ϕ} на поверхности раздела металл—форма S :

$$P_{\phi} = 2\Gamma S l_{\phi} / (3K F_{\phi} \sqrt{\tau}).$$

Из формулы следует, что максимальное избыточное газовое давление на поверхности металл—форма возникнет в начале нагрева формы, когда $\tau \rightarrow 0$. Это подтверждается экспериментально (см. рис. 13). Причина этого — различные скорости распространения температуры и газов в песчаной форме. Температуропроводность песчаных форм мала, поэтому слой формы, вступающий в теплообмен с отливкой, увеличивается медленно. В противоположность этому коэффициент фильтрации газов через форму при значительной ее пористости (30—40 %) достаточно велик, поэтому ширина слоя, принимающего газы, всегда больше ширины слоя, участвующего в теплообмене. В первый момент контакта металла и формы, когда происходит мгновенное выделение газов из нагретого тонкого поверхностного слоя формы, на границе металл—форма возникает самое высокое газовое давление, которое затем будет понижаться в результате преобладания фильтрации газа перед газовыделением.

В период достижения газами максимального значения P_{ϕ} существует наибольшая вероятность их проникания в отливку, так как именно в это время на поверхности отливки может не быть корки твердого металла (это соответствует II стадии охлаждения отливки).

Образование газовых раковин или пор возможно, если избыточное газовое давление превысит противодействующее давление, равное сумме металлостатического напора $H\rho_0$ (H — высота

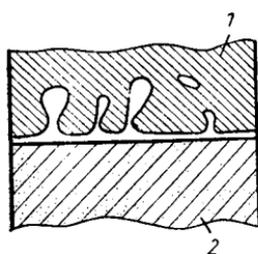


Рис. 14. Газовые раковины на поверхности отливки:

1 — металл; 2 — форма

столба металла в форме) и внешнего давления $P_{вн}$. Кроме того, давление газа должно обеспечить преодоление поверхностного натяжения расплава. При возникновении неблагоприятных условий на поверхности отливки могут формироваться газовые дефекты (рис. 14). В случае возникновения значительного избыточного газового давления в форме в первоначальный момент формирования отливки может произойти «кипение» жидкого металла из-за прохождения через него образовавшегося газа или выброс металла в период заполнения формы.

Избыточное давление газов регулируется изменением соотношения Γ/K , так как использовать в качестве регулирующих другие параметры, например $t_{нал}$, $b_{ф}$, чаще всего нецелесообразно ввиду их влияния на скорость затвердевания отливки и формирование структуры сплава. Поэтому выбирать связующие материалы, а также влажность смесей нужно с учетом возможного газовыделения. С другой стороны, избыточное давление существенно уменьшается при создании благоприятного режима отвода образующихся газов за счет увеличения газопроницаемости формовочных смесей.

Повторное повышение газового давления, как показано на рис. 13, наблюдается лишь в тех случаях, когда на пути движения газа, перемещающегося от поверхности отливки во внешнюю среду, возникает дополнительное и достаточно большое сопротивление. Чаще всего это происходит в формах из влажных формовочных смесей, в которых водяные пары, распространяясь в глубь формы и попадая в более холодные ее слои, конденсируются и заполняют поры смеси. Это приводит к снижению газопроницаемости формы и возрастанию газового давления. Если вторичное повышение газового давления происходит после затвердевания отливки, то оно не влияет на образование газовых дефектов. В противном случае происходит формирование газовых раковин. Их образование наиболее вероятно в толстостенных отливках или герметичных узлах отливок.

Повторное повышенное газовое давление может происходить на поверхности отливки со стороны стержня, если его знаковые части оказываются залитыми металлом, что препятствует удалению газов.

Для предупреждения образования газовых раковин в массивных отливках в результате повторного повышения газового давления необходимо создавать вентиляционные каналы в форме и стержнях, использовать полые стержни.

§ 7. ЛИНЕЙНАЯ УСАДКА СПЛАВОВ. НАПРЯЖЕНИЯ В ОТЛИВКАХ

Температурный коэффициент объемного сжатия твердых металлов β_T благодаря их изотропности равен 3γ (γ — коэффициент линейного сжатия). В связи с этим усадку металлов в твердом состоянии оценивают коэффициентом линейной усадки ϵ .

Линейная усадка сплавов начинается с момента, когда на поверхности отливки образуется твердый каркас, термическое сжатие которого можно оценивать коэффициентом линейной усадки. Температура сплава, при которой формируется необходимый для начала линейной усадки каркас, названа академиком А. А. Бочваром *температурой начала линейной усадки* $t_{н. л. у.}$.

Линейная усадка твердых материалов есть относительное изменение линейных размеров

$$\epsilon = \frac{l_{н. л. у.} - l_{н. л. у.} [1 - \gamma (t_{н. л. у.} - t_{н.})]}{l_{н. л. у.}} = \gamma (t_{н. л. у.} - t_{н.}), \quad (14)$$

где $t_{н.}$ — температура отливки при охлаждении.

Коэффициент линейного термического сжатия γ при ($t_0 = 20^\circ\text{C}$) ряда металлов имеет следующие значения:

Металл	Al	Mg	Cu	Fe	Ti
$\gamma \cdot 10^6, 1/^\circ\text{C}$	21	29	20	12	10

У многих металлов и сплавов при определенных условиях может иметь место предусадочное расширение, связанное с фазовыми превращениями, выделением газов и другими явлениями. Предусадочное расширение может существенно влиять на общую линейную усадку.

Изменение линейных размеров отливки в период охлаждения имеет важное значение для получения изделий заданных геометрических размеров. Сокращение линейных размеров, определяемое только свойствами самого сплава, без внешнего торможения принято называть *линейной (свободной) усадкой*.

На практике относительную величину линейной усадки сплава определяют по изменению размеров отливки (l_0) длинного стержня относительно первоначальных размеров формы (l_ϕ):

$$\epsilon = [(l_\phi - l_0)/l_\phi] \cdot 100\%.$$

Линейная усадка сталей составляет 2—2,8 %, серого чугуна 1—1,5 %, белого чугуна 2 %, никелевых сплавов 2—2,2 %, алюминевых сплавов 1,1—1,8 %.

Для того чтобы получить отливку заданных размеров, размеры модели должны быть больше размеров отливки на величину усадки данного сплава.

При изготовлении сложных по конфигурации отливок усадке сплавов оказывают сопротивление внутренние стержни, выступающие части формы. Кроме механического торможения усадки, сплавы отливок испытывают термическое торможение, связанное

с разницей температур отдельных частей при охлаждении. Поэтому действительное изменение размеров отливки характеризуется коэффициентом литейной (затрудненной), а не линейной усадки. Значения литейной усадки могут быть неодинаковы в различных направлениях даже в пределах одной отливки.

Неравномерность и неодновременность усадки различных частей отливки вызывает возникновение внутренних напряжений трех видов:

механические σ_m (усадочные), обусловленные торможением усадки формой и стержнем;

термические σ_t , появляющиеся в результате разницы скоростей охлаждения отдельных частей отливки;

фазовые σ_f , возникающие в результате неодновременного протекания фазовых превращений в сплаве.

Литейные напряжения σ_l равны сумме напряжений всех видов: $\sigma_l = \sigma_m + \sigma_t \pm \sigma_f$. Фазовые напряжения могут усиливать или ослаблять литейные, так как превращения в сплаве могут протекать с уменьшением или увеличением объема.

Напряжения могут быть *временными* и *остаточными*. Временные напряжения существуют до тех пор, пока действуют внешние силы. Остаточные существуют в отсутствие внешних сил и уравниваются в объеме отливки.

Внутренние напряжения могут достигать больших значений, что приводит к короблению отливок и даже к возникновению в них трещин.

На возникновение механических напряжений сильное влияние оказывают металлические стержни, поэтому их извлекают из отливки задолго до полного охлаждения, устраняя этим препятствие развитию усадки.

Наиболее благоприятные условия для усадки создаются в том случае, когда после формирования поверхностных слоев отливки литейная форма становится податливой. Это достигается введением в смеси добавок, способствующих уменьшению ее прочности при нагреве до высоких температур, использованием полых стержней. На практике широко используют такой технологический прием, как извлечение из формы отливок, не ожидая их окончательного охлаждения.

Рассмотрим возникновение термических напряжений в отливке типа бруса с выступающим тонким ребром I (рис. 15, а). При анализе охлаждения и усадки принимаем: 1) обе части отливки достигнут $t_{н.л.у}$ одновременно; 2) сплав до определенной температуры может пластически деформироваться под воздействием даже незначительных напряжений; 3) переход сплава из пластического состояния в упругое происходит при определенной температуре; 4) коэффициент линейного термического сжатия не зависит от температуры.

Скорости охлаждения сильно отличающихся по толщине I и II частей отливки в разные периоды будут различными, хотя конеч-

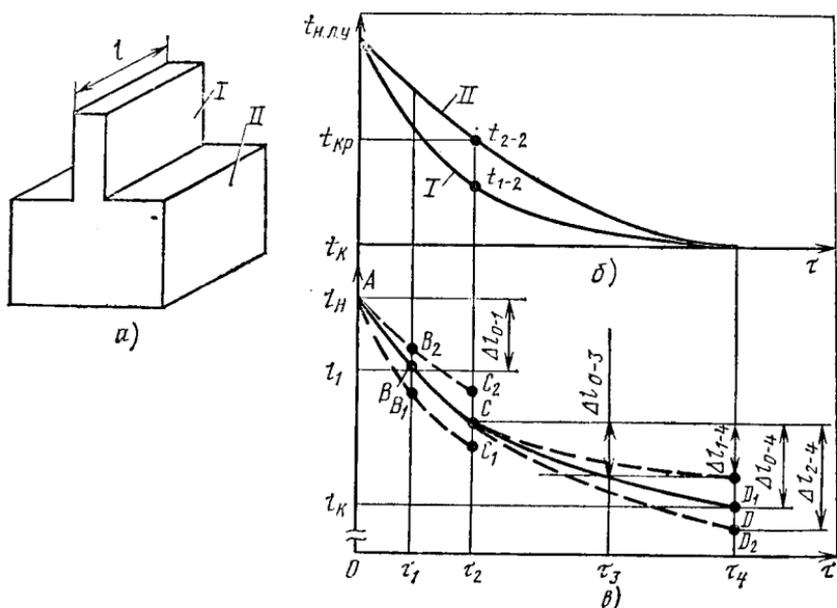


Рис. 15. Изменение температуры t и линейного размера l тонкой (I) и массивной (II) частей отливки ($l_{н}$ и $l_{к}$ — длина отливки соответственно в начале и конце линейной усадки)

ной температуры они достигнут примерно в одно и то же время вследствие высокой теплопроводности (рис. 15, б).

Сплав, имеющий температуру выше $t_{кр}$, находится в области пластических деформаций; ниже $t_{кр}$ — в области упругих деформаций. Изменение линейных размеров отливки и ее отдельных частей показано на рис. 15, в. За период времени $0—\tau_1$ отливка уменьшится на Δl_{0-1} , ее длина будет l_1 (точка В). За это время брус и тонкое ребро охладятся до различных температур. Они должны были бы изменить свою длину пропорционально температурному градиенту: ребро сократится до точки B_1 , массивный брус до точки B_2 . В момент времени τ_1 ребро I относительно свободной усадки сплава растянуто, а брус II сжат.

Благодаря пластической деформации внутренние напряжения в отливке снимаются. Кривая изменения длины всей отливки — кривая АВ — будет проходить между линиями свободной усадки сплавов отдельных ее частей.

При дальнейшем охлаждении сплав тонкого ребра переходит в область упругих деформаций, в то время как сплав массивного бруса продолжает сохранять способность к пластической деформации. В период $\tau_1—\tau_2$ размеры отливки изменяются пропорционально скорости охлаждения тонкого ребра, поэтому кривая ВС параллельна кривой B_1C_1 . Но как только сплав бруса и ребра окажется в области упругих деформаций (при $\tau > \tau_2$), релаксация

(процесс постепенного возврата в состояние равновесия) напряжений проходить не сможет.

Неравномерное охлаждение отдельных частей отливки в этот период приводит к возникновению внутренних напряжений, в том числе и остаточных. Изменение размеров отливки при охлаждении до нормальной температуры составит Δl_{0-4} , и пройдет она за время τ_2 — τ_4 . К моменту времени τ_4 ребро I должно было бы измениться на Δl_{1-4} (кривая CD_1 проходит параллельно соответствующему по времени участку кривой I на рис. 15, б, так как усадка пропорциональна градиенту температур), но из-за массивного бруса, который охлаждается с большей скоростью за счет повышенного температурного градиента, оно упруго сжимается. Так, к моменту τ_3 , когда температура ребра I еще не достигла температуры окружающей среды, его усадка (состояние сплава — упругое) составляет $\Delta l_{1-4} = \Delta l_{0-3}$, но размеры отливки продолжают изменяться, и ко времени полного охлаждения ребро I окажется сжатым уже на D_1D . Сплав бруса II к концу охлаждения полной усадки Δl_{2-4} не претерпевает, и брус оказывается растянутым на DD_2 .

В отливке возникают остаточные внутренние напряжения, величина которых пропорциональна вынужденной деформации D_1D_2 или температурному градиенту массивной и тонкой частей в момент их перехода в область упругих деформаций (t_{2-2} — t_{1-2}). Полнота релаксации напряжений в области пластических деформаций зависит от соотношения скоростей возникновения напряжений и деформации. Если скорость деформации мала, то остаточные напряжения могут вызвать образование трещин в отливке. Для уменьшения остаточных напряжений следует обеспечить равномерное охлаждение всех частей отливки.

Напряжения, возникающие в области упругих деформаций, могут привести к короблению отливки или даже к ее разрушению.

В случае, когда отливка сохраняет свою целостность и конфигурацию, остаточные внутренние напряжения существенно снижают ее прочность.

Напряжения, как результат неравномерности охлаждения, могут возникать не только в сложной отливке с различной толщиной стенок, но и в простой массивной отливке, поверхностные и внутренние слои которой охлаждаются с различными скоростями. После окончания охлаждения поверхностные слои окажутся в сжатом состоянии, а внутренние — в растянутом.

Разрушение металла (образование трещин) под воздействием внутренних напряжений происходит в различные периоды формирования отливки, что определяет название трещин:

кристаллизационные (когда еще имеется жидкая фаза);

горячие (при высоких температурах);

холодные (при низких температурах).

Снизить внутренние термические напряжения в отливках можно конструкторскими и технологическими мероприятиями. Напри-

мер, опасность образования напряжений можно уменьшить, если устранить разнотолщинность, предусмотреть в массивных частях детали внутренние отверстия, а на выступающих частях ребра жесткости. Технологический процесс должен обеспечить оптимальную скорость охлаждения отливок. Это достигается подбором материала формы и температуры заливаемого сплава, выбором места подвода расплава к полости формы, расположения прибылей и холодильных шпонок. В связи с этим важное значение приобретает определение скорости охлаждения отливок в форме в различные периоды.

На основе анализа температурного поля в форме, определяемого количеством теплоты, аккумулированным ею при охлаждении отливки, Г. Ф. Баландин предложил уравнение для расчета времени охлаждения $\tau_{\text{охл}}$ отливки в форме до любой температуры:

$$\tau_{\text{охл}} = 2 \left(\frac{c_0 \rho_0 R}{\sqrt{2n/(n+1)} b_{\text{ф}}} \right)^2 \left[\left(\frac{1}{\theta} - 1 \right) (1 + D) + \ln \theta \right]; \quad (15)$$

$$\theta = (t_{\text{в}} - t_{\text{ф}}) / (t_{\text{л}} - t_{\text{ф}});$$

$$D = \left[\frac{c_{\text{л}} \rho_{\text{л}}}{c_{\text{т}} \rho_{\text{т}}} \left(\frac{t_{\text{зал}} - t_{\text{ф}}}{t_{\text{л}} - t_{\text{ф}}} - 1 \right) + \frac{L}{c_0 (t_{\text{л}} - t_{\text{ф}})} \right],$$

где n — показатель степенной функции, аппроксимирующей распределение температуры по толщине формы в период охлаждения затвердевшей отливки ($n = 1,5 \div 3$); $t_{\text{в}}$ — температура сплава при выливке отливки.

Внутренние напряжения могут быть устранены или практически сняты термической обработкой отливок, обычно отжигом. Во время выдержки при повышенных температурах в металле активно развивается процесс релаксации за счет пластической деформации. Режим термической обработки определяется в зависимости от состава сплава и склонности его к трещинообразованию, массы и конфигурации отливки, способа ее изготовления.

§ 8. ФОРМИРОВАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ ОТЛИВОК

Слой металла, непосредственно прилегающие к поверхности отливки, отличаются наибольшей плотностью и лучшими механическими свойствами. Как было показано, кристаллизация сплава в таких слоях протекает при свободном доступе к ним компенсирующего усадку расплава и при большем, чем во внутренних частях отливки, переохлаждении, обеспечивающем мелкозернистое строение сплава. Механическая обработка, при которой глубокий слой качественного металла переводится в стружку, является нежелательной.

Вместе с тем при изготовлении отливок в песчаных формах поверхности отливок (в основном из стали и чугуна) после извлечения их из формы не всегда оказываются чистыми.

В результате взаимодействия металла с формой на поверхности отливки могут образовываться единичные включения формовочного материала и неметаллическая корка, прочно связанная с отливкой. Эти дефекты существенно затрудняют механическую обработку отливок.

Внедрение в отливку отдельных частиц формовочного материала (неметаллических включений экзогенного характера) является следствием одновременного действия двух неблагоприятных факторов: низкой прочности поверхности формы и сил, способных оторвать от формы слабо связанные с ней частицы. Силы, вызывающие отрыв частиц от формы или стержня, возникают при движении в форме потока металла. Струя металла, направленная на стенку формы, может ее разрушить. В этом случае отдельные зерна песка захватываются расплавом.

Основным поверхностным дефектом отливок является пригар. Под пригаром понимают слой спекшегося или пропитанного формовочного материала, прочно связанного с поверхностью отливки. Если в слой формовочной смеси проникает залитый в форму сплав, то образующуюся кромку называют *механическим пригаром*. Если слой смеси пропитывается жидкостью, образовавшейся в результате химического взаимодействия отливки и формы, то корку называют *химическим пригаром*. Корку из спекшегося формовочного материала называют *термическим пригаром*.

Механический пригар образуется вследствие пропитывания расплавом поверхностного слоя формы и обволакивания зерен формовочного материала. При охлаждении отливки металл затвердевает, образуя корку, в которой, как в сотах, находятся отдельные зерна или скопления зерен формовочного материала.

Механический пригар развивается главным образом на поверхности крупных отливок, которые обладают достаточным запасом теплоты для сильного прогрева формы, поэтому в течение длительного времени не образуется корка твердого металла. Механический пригар в чистом виде встречается редко.

Химический пригар встречается чаще и, как правило, имеет большую толщину. Металлы и сплавы в большинстве случаев не вступают во взаимодействие с используемыми формовочными материалами, однако избежать взаимодействия оксидов этих металлов с компонентами смеси иногда не удается. Например, при использовании чугуна или стали железо не реагирует с обычно применяемым кварцевым песком, в то время как оксиды железа могут образовывать с ними различные силикаты. В случае присутствия в песке флюсующих минералов (слюды, полевого шпата и др.), содержащих оксиды щелочных или щелочно-земельных металлов, образуются силикаты сложного состава, имеющие сравнительно низкую (иногда ниже 1000 °С) температуру плавления и поэтому способные проникать в форму на большую глубину. Процесс проникания заканчивается там, где движущаяся жидкость встречает слой формы, ненагретый до температуры плавления этой жидкости.

Важно отметить, что движение жидкости и ее взаимодействие с формой могут продолжаться и после образования на отливке затвердевшей корки.

На образование пригара влияет состав газов, сосредоточивающихся у поверхности раздела металл—форма. Исследования показали, что в начале процесса газы создают окислительную среду. Затем, по мере вытеснения воздуха, выделения и разложения водяных паров, сгорания, возгонки и диссоциации органических веществ, газовая среда приобретает восстановительный характер.

Один из основных методов борьбы с пригаром — воздействие на газовую среду формы. При литье чугуна, бронз, латуней и некоторых других сплавов в состав формовочных смесей вводят углеродистые добавки (молотый уголь, графит), препятствующие окислению металла. При изготовлении стальных отливок вводить углеродистые добавки не рекомендуется, так как растворение углерода в поверхностном слое стали понижает температуру ее плавления и облегчает пропитку формы. В этом случае на поверхность формы целесообразно наносить слой инертных и малопористых покрытий.

На практике в отдельных случаях разрабатывают меры, направленные не на затруднение образования пригара, а на ослабление его связи с отливкой, т. е. на получение легкоотделимого пригара. Например, при литье стали иногда искусственно увеличивают продолжительность существования в форме окислительной атмосферы. Для этого в форму добавляют сильные окислители, например, марганцевую руду, легко разлагающуюся и окисляющую поверхность отливки. В результате на границе отливка — форма сохраняется слой высших оксидов железа, который обеспечивает легкое удаление пригара. Аналогичные результаты получают при введении в смесь добавок, способствующих затвердеванию жидких силикатов в аморфном виде. Получающееся при этом силикатное стекло отличается хрупкостью, что облегчает его удаление с поверхности отливок.

Взаимодействие металла с формой на различных стадиях формирования отливки оказывает непосредственное влияние на шероховатость ее поверхности, образование зоны с пониженной или, наоборот, повышенной концентрацией углерода по сравнению с внутренними слоями. Особое место занимает поверхностное легирование, обеспечивающее дифференцированные свойства металла по сечению отливки. Формирование легированного слоя происходит в результате взаимодействия сплавов с порошкообразными материалами (чаще всего ферросплавами), нанесенными в виде специальной смеси на поверхность формы или стержня. Поверхностное легирование целесообразно для деталей, срок службы которых определяется износом рабочих поверхностей. В последнее время разработаны способы упрочнения отливок с помощью тугоплавких твердых частиц (оксидов, карбидов, нитридов), когда на поверхности образуется металлокерамический слой.

РАЗДЕЛ II

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

ГЛАВА 3. МОДЕЛЬНОЕ ПРОИЗВОДСТВО

Основную массу фасонных отливок из различных литейных сплавов изготавливают в разовых песчаных формах. Для получения таких форм используют специальную модельно-опочную оснастку, необходимую для получения частей формы, стержней и их сборки. Комплект модельно-опочной оснастки включает: модели и модельные плиты для изготовления по ним частей формы, стержневые ящики для изготовления стержней, вентиляционные плиты для образования вентиляционных каналов в стержнях, плоские и фигурные (драйеры) сушильные плиты для сушки стержней, опоки, приспособления для контроля формы в процессе сборки, а также холодильники, штыри для соединения опок и другой инструмент.

На заводах с массовым и крупносерийным производством изготовлением модельно-опочной оснастки, начиная с проектирования и заканчивая сдачей в литейный цех, занимается специальный модельный цех. Первым этапом подготовки производства модельной оснастки является проектирование модельного комплекта с последующей разработкой рабочих чертежей на все элементы модельной оснастки и необходимой технологической документации. Модельный комплект проектируют на основании технического задания (технологической карты отливки) и данных об имеющемся в литейном цехе оборудовании. Проектирует модельный комплект конструктор-модельщик в тесном контакте с технологами литейного и модельного цехов.

При формовке по шаблону, которую применяют в условиях единичного или мелкосерийного производства для крупных отливок, имеющих конфигурацию тел вращения, модели, а иногда и стержневые ящики не изготавливают. Форму выполняют с помощью деревянных шаблонов. При этом сокращается число объектов модельно-опочной оснастки и ее стоимость. Себестоимость модельного комплекта по сравнению с общей себестоимостью отливки весьма значительна. Снижение трудоемкости изготовления модельной оснастки идет по пути внедрения новых технологических процессов, повышения уровня механизации и автоматизации труда, более широкого использования металлической оснастки вместо деревянной, применения моделей из пенополистирола и т. д.

§ 1. МОДЕЛИ И МОДЕЛЬНЫЕ ПЛИТЫ

Моделями называют приспособления, предназначенные для получения в литейных формах полостей, конфигурация которых соответствует изготавливаемым отливкам. Модель отличается по конфигурации и размерам от получаемой по ней отливки. В зависимости от конструкции отливки она может быть неразъемной и разъемной, состоящей из двух и более частей. Модель снабжают специальными выступающими частями — знаками. Они образуют в форме углубления, предназначенные для установки и фиксирования стержня. Для облегчения извлечения модели из формы их вертикальные стенки выполняются с формовочными уклонами, величина которых зависит от высоты стенки, материала модели и способа изготовления отливки.

В соответствии с чертежом отливки на модели предусматривают припуски на механическую обработку отливки. Размеры модели должны быть больше размеров отливки на величину литейной усадки. Модель должна быть легкой, но достаточно жесткой, что особенно важно при изготовлении полуформ на прессовых машинах. Для машинной формовки модели монтируют на специальных плитах, которые называют *модельными плитами*. Каждая модельная плита состоит из плиты и расположенных на ней моделей отливок, литниковой системы, штырей и т. д. Модельные плиты могут быть односторонними и двусторонними, наборными и цельнолитыми. На односторонних плитах модели располагают только на одной верхней стороне, которую называют рабочей. На двусторонних плитах обе стороны являются рабочими и на них располагают половины модели. Последнее применяют только при безопасной формовке. Наборная плита состоит из плиты и прикрепленных к ней нескольких частей модели и других деталей. Цельнолитую модельную плиту изготавливают заодно с половиной модели.

Деревянные модели и модельные плиты применяют при единичном и мелкосерийном производстве мелких и средних отливок. В зависимости от предъявляемых требований их подразделяют на три класса прочности. Деревянные модели изготавливают трех классов точности в соответствии с тремя классами прочности отливок.

Модельные комплекты первого класса прочности предназначены для длительного использования, второго класса — для периодического использования, третьего класса — для единичного производства неотчетственных, несложных отливок. Для изготовления моделей первого класса прочности используют заготовки, тщательно склеенные из тонких брусков с учетом направления годичных колец, с тем чтобы полностью предупредить коробление модели. Для моделей второго класса прочности заготовки склеивают менее тщательно, используя меньшее число брусков; для моделей третьего класса прочности заготовки склеивают из более

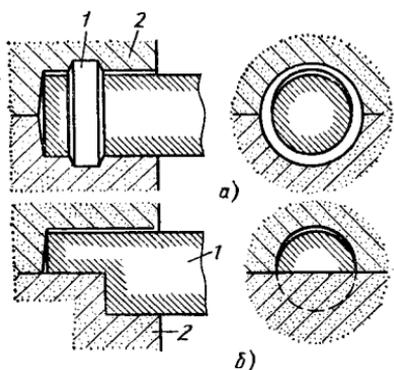


Рис. 16. Стержневые фиксаторы:

а — кольцевой, предотвращающий перемещение стержня в осевом направлении; б — с одним срезом, предотвращающий вращение стержня и перемещение в осевом направлении; 1 — стержень; 2 — форма

толстых кусков. Отдельные части модели допускается делать из целого куска. Прочная модель лучше сохраняет свою точность. Поэтому модельные комплекты первого класса прочности изготавливают по I классу точности, второго класса прочности —

по I и II классам точности, а третьего — по III классу точности.

Дерево является распространенным и недорогим материалом. Оно имеет малую плотность, легко обрабатывается, после чего получается гладкая, чистая поверхность. Недостатки дерева — гигроскопичность, возможность коробления, неоднородность строения и для некоторых пород недостаточная прочность и износостойкость. Для устранения коробления модели покрывают лаками и красками. Формовочные уклоны деревянных моделей составляют 1—3°; чем выше модель, тем меньше формовочные уклоны. Уклоны на внутренних поверхностях модели делают больше, чем на наружных. Места соединения литейной формы со стержнем, называемые *знаковыми частями*, должны обеспечивать вполне определенное и устойчивое положение стержней в форме, поэтому отдельные части часто снабжают фиксаторами (рис. 16). Размеры и элементы стержневых знаков регламентируются ГОСТ 3606—80 и выбираются в зависимости от конструкции отливки и технологии изготовления формы. Между знаками формы и знаками стержней предусматривают зазоры, величина которых также выбирается по ГОСТ 3606—80 и зависит от размеров знаков и класса точности отливки.

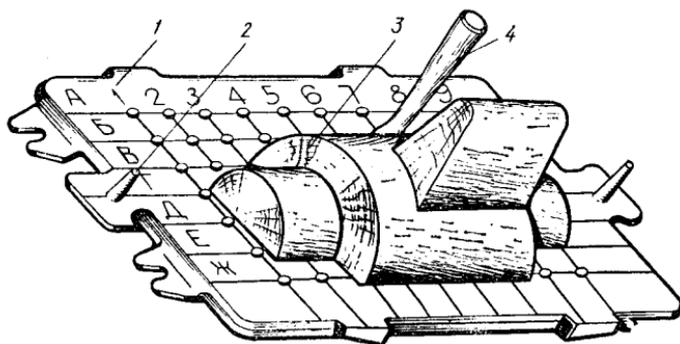


Рис. 17. Координатная модельная плита:

1 — плита; 2 — штырь; 3 — верхняя половина модели отливки; 4 — модель стойка

При машинной формовке в условиях единичного и мелкосерийного производства, когда требуется быстрая смена модели на формовочных машинах, применяют специальную модельную оснастку в виде координатных плит (рис. 17) или плит со сменными вкладышами. На рабочей стороне плиты нанесена сетка прямых линий, в точках пересечения которых просверливают отверстия, каждое из них имеет свой шифр. У каждого штифта полумодели проставлен шифр отверстия в модельной плите, в которое он должен быть вставлен. Это позволяет быстро произвести на машине замену одних полумоделей другими.

В массовом и крупносерийном производстве применять быстро-сменные модели нет необходимости, так как смена моделей производится редко и большей частью в перерыве между рабочими сменами.

Наиболее часто в модельном производстве используют сосну, ольху, бук, липу, ясень. Из сосны изготавливают средние и крупные модели. Сосна является самым дешевым материалом, легко обрабатывается, не склонна к загниванию. Из ольхи делают средние и мелкие модели, непрерывно находящиеся в работе. Обработанная поверхность получается гладкой. Бук и ясень применяют для изготовления особо прочных моделей. Липа относится к породам деревьев, древесина которых не обладает большой твердостью. Из нее изготавливают модели, предназначенные для получения небольшого числа отливок.

Процесс изготовления деревянной модели или стержневого ящика складывается из следующих операций: выполнение в натуральную величину чертежа модели со знаковыми частями и т. п.; изготовление заготовок, их обработка (фрезерование, шлифование и пр.); сборка частей модели (склеиванием с помощью шпунтовых или шиповых соединений и пр.); контроль, приемка и окраска модели.

Модели красят масляной краской, затем покрывают щелочным лаком с целью получения гладкой рабочей поверхности и предохранения ее от воздействия влаги атмосферы и формовочной смеси. Окраску и маркировку проводят в соответствии с ГОСТ 2413—67. Для чугунного литья используют модели красного цвета, для стального — серого, для цветного — желтого. Стержневые знаки и другие не соприкасающиеся с металлом части окрашивают в черный цвет.

На рис. 18 показана деревянная разъемная модель.

Металлические модели и плиты используются в основном в условиях крупносерийного и массового производства отливок. По сравнению с деревянными металлические модели имеют следующие преимущества: долговечность, большую точность и более гладкую рабочую поверхность. Их используют при машинной формовке, которая предъявляет определенные требования к конструкции и качеству модельной оснастки. Конструкция моделей, предназначенных для машинной формовки, должна быть макси-

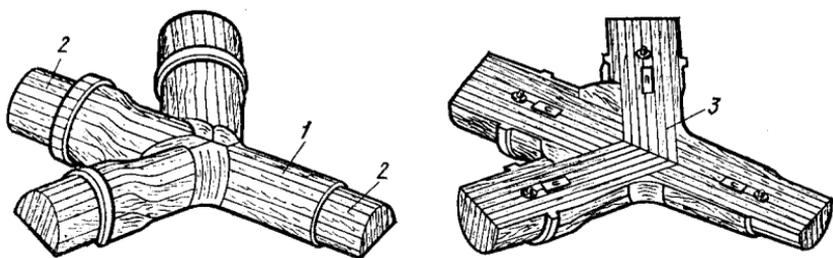


Рис. 18. Деревянная модель:

1 — верхняя половина модели; 2 — знаковые части; 3 — нижняя половина модели

мально упрощена, даже за счет увеличения числа стержней. Это требует повышения точности моделей, центрирования отдельных элементов и узлов оснастки, а также надежности крепления их на модельных плитах. Материалами для металлических моделей и плит служат алюминиевые сплавы, чугун, сталь, бронза и латунь. Алюминиевые модели и плиты имеют малую массу, легко поддаются механической обработке и удобны в работе. Они не окисляются, после обработки приобретают гладкую поверхность. Недостатком алюминиевых моделей является их низкая прочность и малая износостойкость, что особенно сказывается в массовом производстве. Для не очень ответственных моделей используют сплавы АЛ24, АЛ26, для сложных и ответственных — АЛ22, АЛ28.

Чугунные модели прочны, дешевы, хорошо обрабатываются и после обработки имеют гладкую рабочую поверхность. Износостойкость чугуна значительно выше, чем алюминиевых сплавов. Недостатки чугунных моделей: большая масса и окисляемость. Для изготовления оснастки используют чугуны марок СЧ 15, СЧ 20.

Стальные модели и плиты отличаются высокой прочностью и износостойкостью. Для их изготовления используются стали марок 15Л—45Л, а также стальной прокат различного сортамента.

Бронзовые и латунные модели после обработки имеют очень гладкую поверхность, не окисляются; получаемый с их помощью отпечаток является наилучшим по качеству. Они более коррозионно-стойки, чем чугунные и стальные модели, но значительно тяжелее их. Их применяют сравнительно редко для изготовления небольших сложных отливок высокой точности и с повышенным качеством поверхности.

Легкими и жесткими являются облепленные модели — пустотелье, снабженные для жесткости ребрами, расположенными по внутренней полости.

Формовочные уклоны на металлических моделях делают меньше $0,5$ — 1° вследствие того, что рабочие поверхности модели получаются более гладкими. Кроме того, металлические модели, как

правило, применяют для машинной формовки, когда извлечение их из полуформ производится специальным механизмом.

Конструкция модельной плиты зависит главным образом от типа машины, на которой будет изготавливаться полуформа, конструкции отливки, получаемой по данному модельному комплекту, и вида формы. Применяют модельные плиты трех разновидностей: для опочной формовки, для безопочной формовки и для изготовления оболочковых полуформ. Модельные плиты (рис. 19) снабжают специальными лапками или приливами для крепления к столу машины. Для фиксирования опоки на плите они имеют минимум два штыря: один круглый — центрирующий, второй квадратный — направляющий. Центрирующий штырь предохраняет опоку от смещений в горизонтальном направлении, а направляющий — от смещений относительно поперечной оси плиты.

Процесс изготовления металлических моделей складывается из следующих операций: вычерчивание чертежа металлической модели; изготовление деревянной модели, предназначенной для получения металлической заготовки модели; литье металлической

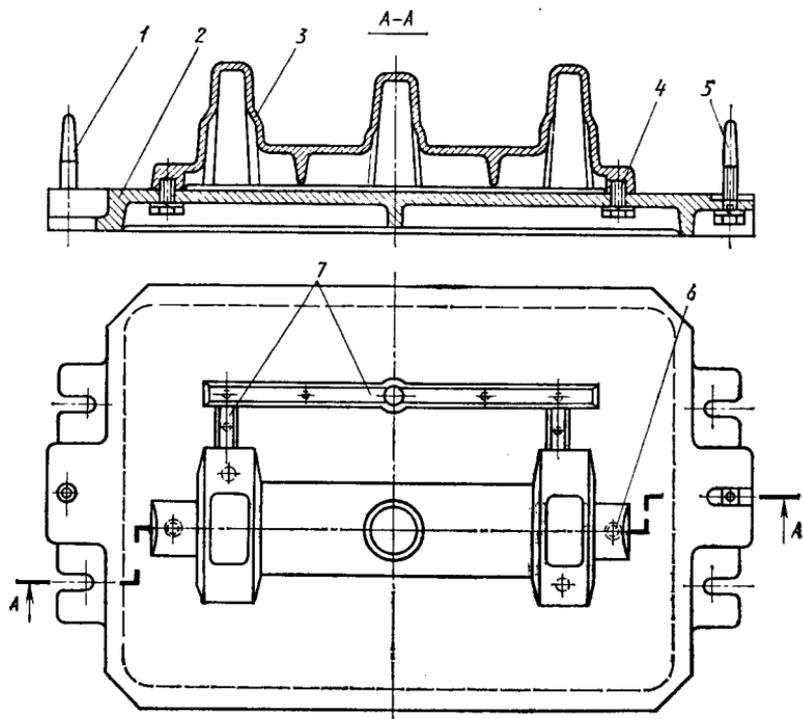


Рис. 19. Расположение моделей отливки и литниковой системы на модельной плите:

1 — штырь центрирующий; 2 — модельная плита; 3 — верхняя половина модели; 4 — крепежный болт; 5 — штырь направляющий; 6 — контрольный штифт; 7 — модели литниковой системы

заготовки модели; ее механическая обработка; монтаж металлической модели на модельной плите; контроль и приемка металлической модельной оснастки.

Размеры деревянной модели (промоделки) для получения отливок металлических моделей увеличены в расчете на двойную усадку: сплава модели и сплава отливки. Промоделка выполняется также с учетом припусков на обработку металлической модели. Литую металлическую модель подвергают тщательной механической обработке по рабочей поверхности, а также по поверхностям соприкосновения с модельной плитой. Затем обработанную модель монтируют на модельной плите.

Крепление половин моделей к плитам осуществляется винтами или болтами с нижней стороны плиты. В том случае, если половины моделей низкие, их крепят винтами сверху. Число и размеры винтов и болтов определяют в зависимости от формы и средних размеров половин модели.

Пластмассовые модели. Все более широкое применение находит в настоящее время модельная и стержневая оснастка из пластических масс. Подобная оснастка, сочетая преимущества деревянной и металлической, обладает малой массой, высокой точностью и прочностью, не подвержена короблению, разбуханию, коррозии при хранении и эксплуатации и позволяет точно воспроизводить контуры модели при формовке.

Вследствие сокращения расхода металла, снижения трудоемкости изготовления, уменьшения потребности в оборудовании и производственных площадях за счет резкого сокращения объема механической обработки и доводочных операций применение пластмассовой оснастки очень эффективно. Для изготовления оснастки применяют термореактивные пластические массы на основе эпоксидных или фенолформальдегидных смол, стиракрил ТШ или акрилат АСТ-Т. Сначала изготавливают гипсовую мастер-модель с учетом усадки пластмассы и металла отливки. По мастер-модели делают гипсовую форму, которую заливают жидкой пластмассой. Готовую пластмассовую модель извлекают из формы и подвергают механической обработке. Крупные модели делают пустотелыми, мелкие — монолитными.

Значительное распространение получило литье по моделям из пенополистирола. Применение этого способа упрощает процесс изготовления отливок, позволяет получать заготовки повышенной точности, приближающиеся по размерам и конфигурации к готовым деталям.

В условиях единичного производства модель изготавливают путем механической обработки стандартных плит и блоков из пенополистирола. Модель представляет собой копию отливаемой детали и отличается от нее припусками на механическую обработку. В условиях крупносерийного и массового производства модели получают в пресс-формах путем тепловой обработки гранул полистирола.

В качестве исходного сырья используют бисерный пенополистирол ПС-Б марки А. Вначале гранулированный (так называемый бисерный) полистирол подвергают предварительной тепловой обработке (предварительному вспениванию), затем вспененным полистиролом заполняют пресс-форму на специальных машинах. Пенополистирол точно воспроизводит конфигурацию рабочих полостей пресс-формы. Готовая модель поступает на формовку.

§ 2. СТЕРЖНЕВЫЕ ЯЩИКИ

Конструкция стержневого ящика зависит от формы и размеров стержня и способа его изготовления. По конструкции стержневые ящики подразделяют на неразъемные (вытряхные) и разъемные, которые для удаления из них стержня разбираются на две или больше частей.

Каждому стержневому ящику этих типов соответствует определенный метод заполнения смесью рабочей полости и отделения от стержня, а также определенная поверхность сушки стержня, если он сушится после удаления из ящика.

Выбор направления заполнения ящика смесью зависит прежде всего от метода изготовления стержня, а также от установки каркасов и холодильников. Поверхность, на которой лежит стержень во время сушки, должна обеспечивать его устойчивое положение при транспортировании и сушке. Желательно, чтобы эта поверхность была плоской, что облегчало бы изготовление стержня и упрощало конструкцию ящика. Размер рабочей полости стержневого ящика увеличивают на величину усадки отливки. Для свободного удаления стержня из ящика на соответствующих его поверхностях предусматривают формовочные уклоны. Для образования знаков стержня в ящике выполняют специальные углубления или выступы.

Деревянные вытряхные и разъемные ящики используют преимущественно в единичном и мелкосерийном производстве. Изготавливают их из тех же пород древесины, что и модели. Разъемные стержневые ящики выполняются с горизонтальным (рис. 20, а), вертикальным (рис. 20, б) или иным разъемом. Части разъемного ящика скрепляют с помощью клиньев, крючков, стяжек.

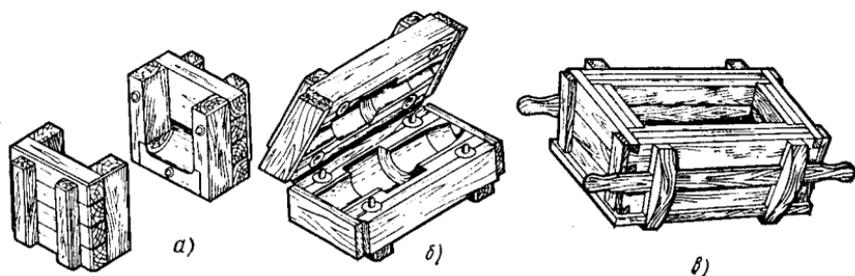


Рис. 20. Деревянные стержневые ящики

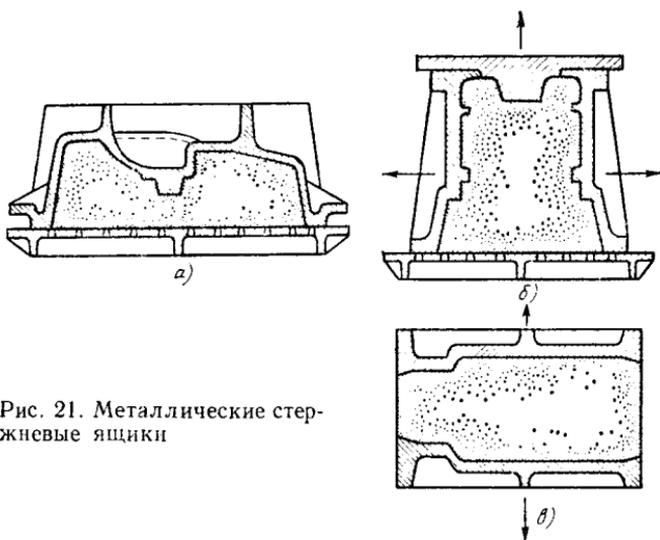


Рис. 21. Металлические стержневые ящики

Вытряхной ящик (рис. 20, в) представляет собой жесткую коробку, в которую вставляют вкладыши, образующие рабочую полость стержня. После изготовления стержня ящик поворачивают на 180° и устанавливают на сушильной плите. Ящик поднимают, со стержня снимают вкладыши и вставляют их в ящик. Изготавливают деревянные ящики так же, как и деревянные модели.

Металлические стержневые ящики применяют в массовом и крупносерийном производстве. Их выполняют преимущественно из алюминиевых сплавов. Металлические стержневые ящики делают вытряхными (рис. 21, а), но чаще разъемными с вертикальным (рис. 21, б) и горизонтальным (рис. 21, в) разрезами. Части стержневого ящика соединяют с помощью штырей и скрепляют скобами или откидными барашками или крепят в зажимах машины.

Металлические стержневые ящики выполняют тонкостенными; толщину стенки выбирают в зависимости от материала и размеров ящика. С целью увеличения жесткости стержневой ящик с внешней стороны снабжается ребрами жесткости, а в плоскостях набивки и разреза для увеличения конфигурационной прочности — бортиками, которые для предохранения от быстрого износа бронируют стальными пластинками.

Очень большое распространение получили пескодувный и пескострельный способы изготовления стержней. Для пескодувных машин применяют неразъемные и разъемные стержневые ящики. При заполнении смесью они испытывают избыточное давление воздуха, абразивное действие песчано-воздушной струи, а также усилие поджима ящика к надувному соплу машины, поэтому должны обладать повышенной жесткостью, прочностью, быть герметичными по плоскости разреза и надува.

Для выхода воздуха из ящика в поверхности разъема выполняют специальные щели глубиной 0,15—0,2 мм. Стержневая смесь через них не проходит. У сложных по конфигурации стержневых ящиков, имеющих разветвления, углубления и карманы, вывод воздуха обеспечивается вентиляционными пробками (вентами).

Все большее применение находят способы изготовления стержней в нагреваемой оснастке и из холоднотвердеющих смесей (ХТС). Нагреваемая оснастка состоит из собственно стержневого ящика, системы нагрева, системы толкателей для удаления стержня из ящика, системы спаривания и вентиляционной системы. Она должна выдерживать значительные внутренние термические напряжения, возникающие при нагреве до 300 °С и последующем охлаждении, и сохранять при этом высокую механическую прочность. Конструкция стержневого ящика должна обеспечить минимальное его коробление при нагреве, поэтому стенки ящика выполняют толщиной не менее 20 мм и снабжают ребрами жесткости. Изготавливают ящики из специальных легированных чугунов и сталей.

При изготовлении стержней пескодувным способом из ХТС преимущественно используют металлические ящики. Так как стержни извлекаются из ящиков в отвержденном состоянии, последние должны изготавливаться с увеличенными в полтора-два раза формовочными уклонами. Предусматривается механизированное извлечение стержней системой толкателей.

Металлические стержневые ящики делают так же, как и металлические модели, но при этом учитывают не двойную усадку, а только усадку материала стержневого ящика.

Стержневые ящики для автоматических стержневых линий конструируют таким образом, чтобы их внешние размеры соответствовали допустимым для данной линии наибольшим размерам. Мелкие стержни производят в многогнездных ящиках. Унификация стержневых ящиков приводит к унификации сушильных плит и автоматизации всех вспомогательных операций по изготовлению стержней.

Стержневые ящики из пластических масс бывают двух типов: пластмассовые в корпусе из алюминиевых сплавов, предназначенные для массового и крупносерийного производства и обеспечивающие изготовление до 30 000 стержней, и цельнопластмассовые, предназначенные для мелкосерийного и серийного производства, обеспечивающие изготовление до 1000 стержней.

§ 3. ОПОКИ

Опоки делают из серого чугуна, стали, алюминиевых и магниевых сплавов. Чугунные опоки изготавливают и применяют преимущественно в чугунолитейных цехах. Для производства стальных опок, более прочных и долговечных, чем чугунные, применяют углеродистую сталь. Опоки из алюминиевых сплавов

значительно более легкие, чем чугунные и стальные, очень удобны в работе, но менее жестки. Опоки из магниевых сплавов являются наиболее легкими и достаточно прочными, но дорогими. По конфигурации опоки бывают прямоугольными, круглыми и реже — фигурными.

Опоки могут быть цельнолитыми и сварными. В зависимости от размеров и массы их подразделяют на ручные и крановые.

Крановые опоки (рис. 22) обслуживаются подъемными механизмами. Для транспортирования они снабжены цапфами.

Для облегчения выхода газов и паров воды в стенках опоки выполняют специальные отверстия, называемые вентиляционными. Для удержания уплотненной смеси в опоке и увеличения жесткости конструкции средние и крупные опоки снабжают внутренними ребрами. Для упрощения обработки опок верхний уровень ребер жесткости часто выполняется ниже бортиков опок.

Соединяются опоки с помощью втулок и центрирующих штырей. Опоки имеют ушки, предназначенные для установки в них втулок — центрирующих (круглых) и направляющих (эллипсных).

Во избежание поднятия верхней полуформы гидростатическим давлением жидкого металла ее нагружают или скрепляют верхнюю и нижнюю полуформы. В массовом производстве наиболее распространено скрепление опок скобами или нагружение грузом, в единичном или мелкосерийном производстве — штырями с клиньями или болтами с гайками.

Производство отливок на автоматических формовочных линиях вносит определенную унификацию в модельно-опочную оснастку. На каждой линии применяются модельные плиты и опоки определенных размеров. Это является необходимым условием

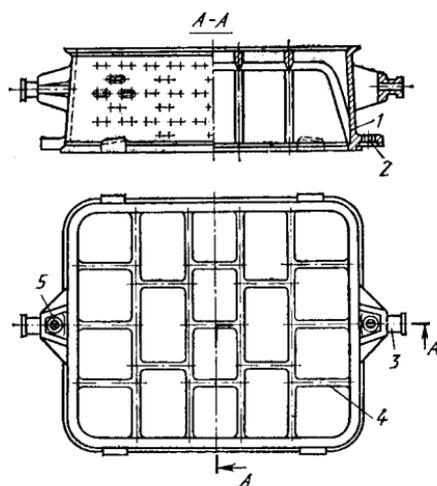


Рис. 22. Прямоугольная крановая опока:

1 — стенка; 2 — направляющая втулка; 3 — цапфа; 4 — ребро жесткости; 5 — центрирующая втулка

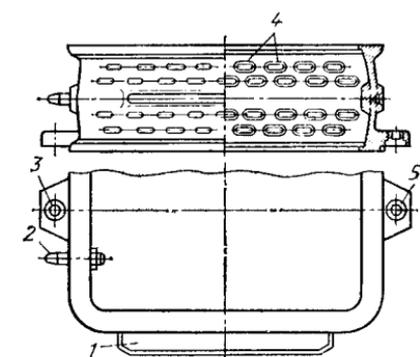


Рис. 23. Опока для формовочного автомата:

1 — направляющая планка; 2 — штырь для кантовки; 3 — центрирующая втулка; 4 — вентиляционные отверстия; 5 — направляющая втулка

автоматизации транспортирования опок и модельных плит, установки опок на модельную плиту и пр. Несколько увеличенный, в ряде случаев до 20 %, расход формовочных смесей при использовании опок единых размеров окупается за счет резкого увеличения производительности и степени механизации. Опoki должны иметь жесткую конструкцию и точно выдержанные внутренние и внешние размеры, тщательно обработанные базовые плоскости, удобные направляющие и фиксирующие устройства для сборки двух полуформ. Желательно, чтобы нижняя опока не имела крестовин, что упростило бы выбивку отливок из формы. На формовочных автоматических линиях часто применяются специальные симметричные взаимозаменяемые опoki.

У большей части автоматов передача опок к машине и от машины осуществляется по специальным рельсовым направляющим с роликами, на которые опирается опока своими ребрами, расположенными вдоль боковых стенок (рис. 23).

На современных прессовых формовочных автоматах смесь уплотняется при высоком удельном усилии. При этом возникают большие давления на стенки опoki и обычные опoki деформируются, что вызывает искажение размеров форм, поэтому на подобных автоматах используют опoki повышенной жесткости.

§ 4. ПРОЧИЙ ИНСТРУМЕНТ И ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

В комплект модельно-опочной оснастки, кроме моделей, модельных плит, стержневых ящичков и опок, входят подопочные плиты, сушильные плиты, наполнительные рамки, шаблоны и другие приспособления. Подопочные плиты, на которые устанавливают формы, изготавливают максимально легкими и достаточно жесткими. Для обеспечения необходимой жесткости плита снабжается реберной сеткой. Для скрепления с опочкой (при необходимости) у подопочных плит предусматривают конические платики для скоб. Для отвода газов из формы вниз в плите выполняют сквозные отверстия. Большую часть подопочных плит делают из алюминиевых сплавов.

Сушильные плиты бывают двух видов: специальные с фасонной опорной поверхностью для стержня (драйеры) и с ровной опорной поверхностью. Основное требование к ним — максимальная жесткость конструкции при наименьшей массе. Температурные колебания, которым подвержены сушильные плиты при их эксплуатации, вызывают значительное их коробление. Для выхода газа из стержней в плитах предусмотрена система отверстий. Изготавливают сушильные плиты из алюминиевых сплавов.

Для выполнения в стержне вентиляционных каналов применяют вентиляционные плиты. Вентиляционные каналы в стержне всегда должны быть расположены вполне определенно, особенно, если они являются частью общей вентиляционной системы. Несоответствие каналов одного стержня с каналами других стержней

или формы нарушает действие всей вентиляционной системы формы. Поэтому каждая вентиляционная плита должна соответствующим образом центрироваться на стержневом ящике с помощью втулок, запрессованных в стержневом ящике, и штырей, закрепленных в плите.

Шаблоны предназначены для контроля размеров стержней и форм, предварительной сборки нескольких стержней в один общий узел, проверки установки стержней в форму и т. д.

ГЛАВА 4. ФОРМОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

К формовочным материалам относятся все материалы, используемые для изготовления разовых форм и стержней. Различают исходные формовочные материалы и формовочные смеси. Основными исходными материалами являются песок и глина, вспомогательными — связующие вещества и добавки. Кроме исходных материалов, для приготовления формовочных смесей используют отработанные (бывшие в употреблении) смеси.

В зависимости от назначения различают формовочные и стержневые смеси и вспомогательные составы. Правильный выбор смесей имеет большое значение. Известно, что около половины брака отливок возникает из-за низкого качества формовочных материалов и смесей.

Важнейшими свойствами смесей являются теплофизические, механические, технологические свойства и свойства, определяющие газообмен.

1. Теплофизические свойства смесей определяют скорость и последовательность затвердевания залитого в форму металла и режим охлаждения отливки. Образование ряда дефектов в отливках (напряжений, трещин, пригара, ужимин и др.) также связано с теплофизическими свойствами смесей.

Основными теплофизическими характеристиками смесей являются их удельная теплоемкость c , теплопроводность λ , температуропроводность a и коэффициент тепловой аккумуляции теплоты b . Значения этих характеристик для формовочных и стержневых смесей, применяемых в литейном производстве, следующие: $c = 1060 \div 1980$ Дж/(кг·К), $\lambda = 0,54 \div 5,6$ Вт/(м·К), $a = (2,64 \div 7) \cdot 10^{-7}$ м²/с, $b = 900 \div 3700$ Вт·с^{1/2}/(м²·К).

Использование в составе смесей хромомagneзита, хромистого железняка и цирконовых песков, а также повышение степени уплотнения смесей или снижение их пористости увеличивает удельную теплоемкость, теплопроводность и коэффициент тепловой аккумуляции теплоты.

2. Механические свойства смесей характеризуются их прочностью, осыпаемостью, пластичностью и податливостью в уплотненном состоянии. Литейные формы и стержни должны обладать

определенной прочностью и не разрушаться под воздействием собственного веса и различных нагрузок при сборке и транспортировании. Во время заливки форма должна выдерживать статическое и динамическое давления струн металла. Практическое значение имеют пределы прочности смесей при сжатии, растяжении, срезе и изгибе.

Литейные формы можно заливать во влажном и высушенном состояниях. В соответствии с этим и прочность смесей определяют на влажных и сухих образцах. Прочность сырых смесей зависит главным образом от свойств жидких и полужидких пленок, покрывающих зерна песка (воды, увлажненной глины, растворов органических связующих, жидкого стекла и др.). Прочностные свойства зависят также от размеров, формы и однородности зерен песка. Предел прочности при сжатии смесей в сыром состоянии обычно составляет $(0,2—0,8) 10^5$ Па, а после сушки он возрастает в 4 раза и более, что связано с упрочнением поверхностных пленок связующих веществ.

Осыпаемость (поверхностная прочность) характеризует способность формы или стержня сохранять свою конфигурацию под воздействием струи металла, других усилий, возникающих, например, при транспортировании или сборке формы. Осыпаемость может вызвать образование засоров, состоящих из частиц формовочных материалов. Поверхностная прочность зависит от содержания и качества глины или других связующих материалов, влажности смеси и режима сушки формы и стержней. Длительное ожидание заливки приводит к увеличению осыпаемости формы.

Пластичность — способность смеси передать форме (стержню) точные очертания модели (стержневого ящика) под воздействием внешних сил и сохранять принятую форму после удаления модели (стержневого ящика). Пластичность зависит от состава смеси, ее влажности и способа приготовления, размеров и формы зерен песка. Наибольшей пластичностью обладают смеси с высоким содержанием глины.

Податливость — способность смеси сокращаться в объеме под действием сжимающих усилий отливки во время усадки. При недостаточной податливости в отливке возникают напряжения и трещины. Податливость связана с прочностью смеси и потерей этой прочности при высоких температурах. Чем больше пористость и пластичность смеси, тем выше ее податливость.

3. Свойствами, определяющими газообмен, являются газопроницаемость и газотворность.

Во время заливки металла и последующего охлаждения отливки в порах формы повышается газовое давление за счет нагрева и расширения воздуха, испарения влаги, газификации и сгорания связующих материалов и разложения кристаллогидратов, карбонатов и других нестойких минералов, входящих в состав формовочных песков, глин и других материалов. Если к моменту возникновения в форме высокого газового давления на по-

верхности отливки не успела образоваться достаточно прочная корка затвердевшего металла, а газы не имеют возможности свободно проходить через стенки формы, то они устремляются в жидкий металл, образуя в затвердевающей отливке газовые раковины. Способность смеси пропускать газы через толщу формы называется *газопроницаемостью*. При достаточно высокой газопроницаемости смеси газовые дефекты в отливках не образуются.

Газопроницаемость смеси зависит от ее влажности, размеров и однородности зерен песка, содержания глины, степени уплотнения смеси и находится в пределах от 20 (алюминиевые и магниевые сплавы) до 120 (сталь, чугун) единиц.

4. Технологические свойства смеси не характеризуют физическими и химическими параметрами. Обычно их определяют экспериментально.

Текучесть — способность смеси под действием внешних сил обтекать модели или заполнять полости стержневых ящиков. Хорошая текучесть наблюдается, когда смесь перемещается не только в направлении приложенной силы, но и в других направлениях, в том числе перпендикулярном. По всему объему уплотняемой смеси должна достигаться наибольшая равномерность ее плотности и прочности при минимальной затрате усилий. Вследствие низкой текучести в форме могут образовываться рыхлоты, и прочность смеси будет неоднородной. Текучесть зависит от природы и количества связующих и глины, влажности смеси, размеров и формы зерен песка и методов приготовления смеси.

Гигроскопичность — способность смесей после сушки поглощать влагу из окружающей атмосферы. Формы и стержни не должны быть гигроскопичны. В противном случае, особенно при вынужденном выстаивании форм в ожидании заливки металлом, они переувлажняются и теряют поверхностную прочность, что ведет к образованию в отливках газовых раковин и засоров.

Выбиваемость — способность формовочных и стержневых смесей свободно удаляться из отливки после ее охлаждения. Хорошая выбиваемость обычно связана с потерей прочности связующего материала после завершения формирования отливки.

Термохимическая устойчивость — способность смеси не оплавляться при соприкосновении с жидким металлом и не образовывать с ним и с его оксидами химические соединения. При низкой термохимической устойчивости на поверхности отливок образуется пригар в виде трудноотделимого металлокерамического слоя.

§ 1. ИСХОДНЫЕ ФОРМОВОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Пески. К формовочным пескам относят горные породы, существующие в природных условиях в виде россыпей, образованных зернами тугоплавких, прочных и твердых минералов. В литейном производстве наиболее часто используют кварцевые пески.

Кварц, являющийся одной из форм существования кремнезема (SiO_2), обладает высокой огнеупорностью (1713°C), прочностью, твердостью (7 по шкале Мооса) и низкой химической активностью.

Недостатками кварца, как основы формовочных и стержневых смесей, являются его аллотропические изменения при нагреве и охлаждении. При температуре 575°C β -кварц переходит в α -кварц, что сопровождается увеличением его объема на 2,4 %. При охлаждении нагретого α -кварца происходит обратное превращение с сокращением объема. В каждом производственном цикле при нагреве от заливаемого в форму металла и последующем охлаждении эти изменения объема при сравнительно невысокой теплопроводности кварца приводят к возникновению напряжений и растрескиванию кварцевых зерен и обогащению смеси пылевидными частицами.

В целях повторного использования отработанной смеси (восстановления свойств) после каждого производственного цикла в нее вводят 3—15 % свежих кварцевых песков.

Природные кварцевые пески содержат примеси оксидов железа, полевого шпата, слюды и других минералов. Полевой шпат и слюда содержат оксиды щелочных и щелочно-земельных металлов. Все эти примеси являются вредными, так как снижают огнеупорность кварца, образуя с ним и оксидами заливаемого металла сложные легкоплавкие силикаты типа $n\text{SiO}_2 \cdot m\text{FeO} \cdot p\text{Na}_2\text{O}$. Поэтому содержание вредных примесей, особенно в песках, предназначенных для использования при литье стали, чугуна и других высокотемпературных сплавов, ограничивается.

В природных кварцевых песках часто содержится глина. Если она имеет хорошие связующие свойства, то такая примесь может рассматриваться как полезная.

Наряду с минералогическим составом важным свойством песка является его зерновое строение, которое характеризуется размером, формой и однородностью зерен. От зернового строения зависят теплофизические, механические и технологические свойства смеси, а также его газопроницаемость. Перед зерновым анализом от песка отделяется отмучиванием в воде глинистая составляющая, к которой относятся все частицы размеров $\leq 0,02$ мм.

Формовочные пески подразделяют на классы в зависимости от содержания глинистой составляющей, кремнезема и вредных примесей (табл. 5).

Обогащенные кварцевые пески содержат минимальное количество глинистых составляющих и вредных примесей, в кварцевых песках их несколько больше. Пески, содержащие 2—50 % глинистой составляющей, называют глинистыми. Материалы, содержащие более 50 % глинистой составляющей, относятся к глинам.

После определения глинистой составляющей определяют крупность и однородность зерен песчаной основы. Для этого остаток, получившийся после отмучивания глины, просеивают на ситах.

Содержание глинистой составляющей, кремнезема и вредных примесей в формовочных песках

Класс	Наименование	Содержание глинистой составляющей, %, не более	Содержание кремнезема SiO ₂ , %, не менее	Содержание вредных примесей	
				оксидов щелочно-земельных и щелочных металлов, %, не более	оксида железа Fe ₂ O ₃ , %, не более
Об1К Об2К Об3К	Обогащенный кварцевый	0,2 0,5 1	98,5 98 97,5	0,4 0,75 1	0,2 0,4 0,6
1К 2К 3К 4К	Кварцевый	2 2 2 2	97 96 94 90	1,2 1,5 1 —	0,75 1 1,5 —
Т	Тощий	10	—	—	—
П	Полужирный	20	—	—	—
Ж	Жирный	30	—	—	—
ОЖ	Очень жирный	50	—	—	—

Каждому сити присвоен номер, соответствующий размеру стороны ячейки, выраженному в миллиметрах.

Номер сита 2,5 1,6 1 0,63 0,4 0,315 0,2 0,15 0,1 0,063 0,05
 Размер стороны ячейки, мм 2,5 1,6 1 0,63 0,4 0,315 0,2 0,15 0,1 0,063 0,05

Рассев песка производится на приборе, который сообщает стопке сит с навеской песка вращательные движения с периодическими встряхиваниями. После окончания просева (через 15 мин) навеску песка на каждом сите взвешивают. В зависимости от размера зерен основной фракции пески подразделяют на группы (табл. 6).

Размер зерна определяется размером стороны ячейки сита, на котором остается зерно после прохождения через предыдущее сито. Основной фракцией песка считается наибольшая сумма остатков на трех смежных ситах. Группа песка обозначается номером среднего сита основной фракции. В зависимости от величины остатка основной фракции на крайних ситах пески делятся на две

Зерновой состав песков

Группа	Наименование	Номера смежных сит, на которых остаются зерна основной фракции		
063	Грубый	1	063	.04
04	Очень крупный	063	04	0315
0315	Крупный	04	0315	02
02	Средний	0315	02	016
016	Мелкий	02	016	01
01	Очень мелкий	016	01	0063
0063	Тонкий	01	0063	005
005	Пылевидный	0063	005	Тэзик

категории — А и Б. К категории А относятся пески с остатком основной фракции на крайнем верхнем сите большим, чем на крайнем нижнем сите, а к категории Б — пески с остатком на крайнем нижнем сите большим, чем на крайнем верхнем.

Необогащенные кварцевые пески по характеру распределения зерен подразделяют на пески с сосредоточенной зерновой структурой, у которых преобладающая масса зерен (не менее 70 %) остается на трех смежных ситах, и пески с рассредоточенной зерновой структурой, у которых преобладающая масса зерен на трех ситах составляет не менее 60 %.

Пески обогащенные и природные полужирные, жирные и очень жирные должны иметь сосредоточенную зерновую структуру.

Форма зерен песка может быть округлой, полукруглой и остроугольной. При маркировке песков на первое место ставят класс, затем группу и категорию, например, 2К02А. Песок этой марки относится к классу 2К, с основной фракцией средней крупности, оставшейся на ситах 0315, 02 и 016. Категория А показывает, что на сите 0315 остаток больше, чем на сите 016.

Иногда вместо кварцевых песков применяют другие материалы, например, хромистый железняк, хромомагнетит, циркон и др. Формовочные и стержневые смеси, в состав которых входят эти материалы, имеют повышенные теплоаккумулирующую способность и химическую инертность по отношению к заливаемым металлам и их оксидам. При заливке металла в формах возникают меньшие температурные напряжения и изменения объема, так как у этих материалов отсутствуют аллотропические превращения. Использование этих материалов позволяет получать, например, крупные и массивные стальные отливки с чистой поверхностью (без пригара) с более высокой точностью размеров.

Глины. Формовочные глины, используемые для связывания зерен песка, являются горными породами, которые в своем естественном состоянии после увлажнения обладают высокой пластичностью. Вокруг глинистых частиц, несущих на своей поверхности электрический заряд, образуются гидратные оболочки, обеспечивающие легкое скольжение частиц относительно друг друга при сохранении их сцепления и без нарушения сплошности материала при деформации. Количество удерживаемой воды зависит от основного минерала глины, размера частиц этого минерала и от присоединенных к нему веществ. Чем больше воды на поверхности

способна удерживать глина, тем выше ее связующая способность и пластические свойства.

В зависимости от минералогического состава глины подразделяют на каолиновые (К), бентонитовые (Б) и полиминеральные (П).

В каолиновых глинах основным минералом является каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$, имеющий слоистую кристаллическую решетку. На границах каждого слоя с одной стороны имеются ионы кислорода, а с другой — гидроксильные группы. Валентные связи между соседними слоями отсутствуют, и их взаимодействие определяется силами Ван-дер-Ваальса.

Вода окружает многослойный кристалл гидратной оболочкой. Чем меньше отдельные кристаллы, входящие в состав глины, тем больше общий объем гидратных оболочек и тем выше ее связующая способность.

По краям пластин каолинита всегда имеются группы SiO_4^- , неиспользованные валентности которых обуславливают химическую активность пограничного слоя кристалла. В природных условиях к аннионам SiO_4^{4-} присоединяются катионы Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Al^{3+} и др. При увлажнении происходит диссоциация, анионом является сам кристалл каолинита, а катионами — присоединившиеся элементы. Анионы и катионы при этом удерживают вокруг себя некоторое количество воды. Количество удерживаемой воды зависит от свойств катионов. Наибольшее количество воды удерживают глины, содержащие ионы Na^+ , затем идут глины, содержащие K^+ , и далее глины, содержащие ионы щелочно-земельных металлов.

Все основные технологические свойства формовочных глин определяются их минералогическим составом, размером частиц, количеством и составом присоединенных катионов.

При нагреве в глинах протекают процессы, вызывающие постепенное и скачкообразное изменение их связующих свойств. Прочность формовочных смесей, в состав которых входит глина, при нагреве до 100°C и несколько выше увеличивается, что объясняется повышением сцепления между глинистыми частицами по мере удаления гигроскопической влаги. В интервале $350\text{--}650^\circ\text{C}$ из глины удаляется кристаллизационная влага, и она теряет свои связующие свойства.

Бентонитовые или монтмориллонитовые глины обладают более высокой связующей способностью. Основным минералом является монтмориллонит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O} \cdot n \text{H}_2\text{O}$. Эти глины также имеют слоистое строение, но по границам слоев расположены только ионы кислорода, и связь между соседними слоями более слабая по сравнению с каолиновыми глинами. Молекулы воды не только находятся на поверхности кристалла, но и между его слоями. Поэтому кристаллы обладают способностью к внутрискристаллическому набуханию: расстояние между слоями кристалла увеличивается примерно в 3 раза.

По прочностным свойствам формовочные глины во влажном состоянии делят на группы: прочносвязующие (П), среднесвязующие (С) и малосвязующие (М). При этом предел прочности при сжатии для стандартной смеси, в состав которой входит бентонитовая глина, должен быть не менее $1,3 \cdot 10^5$ Па (для П); $1,1 \cdot 10^5$ Па (для С); $0,9 \cdot 10^5$ Па (для М) и для каолиновой глины соответственно $1,1 \cdot 10^5$ Па; $0,8 \cdot 10^5$ Па; $0,5 \cdot 10^5$ Па.

По прочностным свойствам в сухом состоянии глины подразделяют на подгруппы: прочносвязующие (1), среднесвязующие (2) и малосвязующие (3). При этом предел прочности при сжатии для стандартной смеси в сухом состоянии, в состав которой входит бентонитовая глина, должен быть не менее $5,5 \cdot 10^5$ Па; $3,5 \cdot 10^5$ Па; $3 \cdot 10^5$ Па и для каолиновой глины соответственно $4,5 \cdot 10^5$ Па; $3 \cdot 10^5$ Па; $2 \cdot 10^5$ Па.

По содержанию вредных примесей (Fe_2O_3 , $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$, $\text{CaO} + \text{MgO}$) глины делят на группы с низким (T_1), средним (T_2) и высоким (T_3) содержанием примесей. При этом массовая доля этих примесей не должна превышать соответственно 6; 12,5 и 21 %. Чем меньше в глине примесей, тем выше ее термохимическая устойчивость.

Маркируют глины в зависимости от минералогического состава, прочностных свойств во влажном и сухом состояниях и количества вредных примесей. Так, например, марка БПТ₂ означает, что глина бентонитовая, прочносвязующая во влажном и сухом состояниях и со средним содержанием вредных примесей.

Вспомогательные материалы. Формовочные и стержневые смеси, в которых связующим является глина, обладают рядом недостатков. Для получения высокой прочности смеси в нее необходимо вводить большие количества глины и воды, что значительно снижает газопроницаемость смеси и увеличивает пригар на отливках. Такие смеси характеризуются плохими податливостью и выбиваемостью.

Для улучшения свойств смеси в нее взамен глины вводят вещества, называемые связующими. Связующие должны обеспечивать: высокую общую и поверхностную прочность форм и стержней после сушки или другой обработки;

высокую текучесть, хорошую газопроницаемость и низкую газотворную способность;

высокую податливость и выбиваемость смесей за счет снижения их прочности к моменту начала усадки отливки;

отсутствие прилипания смесей к моделям и стержневым ящикам.

Перечисленные требования должны выполняться при введении сравнительно малых количеств связующего (0,5—6 %). Основными классификационными признаками этих материалов являются их химическая природа, способность сообщать смесям прочность, отношение к воде, их гидрофильность и гидрофобность (табл. 7).

Классификация связующих

Класс	Группа	Обозначение	Название	Характер затвердевания	Удельная прочность, 10^5 Па/%
А	1	А-1	Синтетические смолы, ПК-104 (пудвербакелит), высушающие масла, слифа, льняное масло, П	Необратимый	>5
	2	А-2	Смолосодержащие продукты и их комбинации с органическими водными материалами, ГТФ, ДП, БК, 4ГУ	Промежуточный	3—5
	3	А-3	Смолосодержащие продукты, пеки (древесный, торфяной, каменноугольный), канифоль	Обратимый	<3
Б	1	Б-1	Синтетические смолы, МФ-7, М	Необратимый	>5
	2	Б-2	Коллоидные растворы органических веществ и эмульсии неводной органической фазы в водной среде с растворенными органическими материалами, СП, СБ, КТ, декстрин	Промежуточный	3—5
	3	Б-3	Коллоидные растворы органических веществ, ССБ, патока	Обратимый	<3
В	1	В-1	Жидкое егекл	Необратимый	>5

Деление связующих на классы (А, Б, В) позволяет ориентировочно предопределять свойства смесей: их прочность во влажном состоянии, текучесть, податливость, выбиваемость, а также возможность комбинации связующего с глиной. К классу А относятся органические связующие, не растворимые или не смачиваемые водой; к классу Б — органические связующие, растворимые или смачиваемые водой, к классу В — неорганические связующие, растворимые или смачиваемые водой.

По удельной прочности $\sigma_{уд}$ связующие всех классов делят на три группы

$$\sigma_{уд} = 100\sigma / [p(100 - v)],$$

где σ — предел прочности при растяжении сухого образца (в расчете на 1 % связующего); p — общее количество связующего, вводимого в смесь; v — содержание растворителя в связующих. В состав испытываемой смеси вводят оптимальное количество связующего, определяемое ГОСТами или техническими условиями.

Удельная прочность зависит от характера затвердевания пленок связующего. Если при затвердевании протекают глубокие необратимые химические изменения, например, окисление, полимеризация или поликонденсация молекул, то удельная прочность связующих более $5 \cdot 10^5$ Па/% и соответственно при обратимом затвердевании удельная прочность менее $3 \cdot 10^5$ Па/%. Некоторые связующие обладают промежуточным характером затвердевания, при котором одновременно протекают обратимые и необратимые процессы.

Органические связующие (А, Б), имеющие широкий диапазон технологических свойств, при высоких температурах сравнительно легко разлагаются и обеспечивают хорошую податливость и выбиваемость. Неорганические связующие (В) хорошо выдерживают воздействия высоких температур, но имеют более низкую податливость и выбиваемость.

Синтетические смолы (А-1 и Б-1) в настоящее время находят широкое применение при изготовлении стержней, твердеющих в нагреваемой и холодной оснастке. Фенолформальдегидные и фурановые смолы, твердеющие в результате процессов поликонденсации, имеют высокую термостойкость, используются в стальном литье; менее термостойкие карбамидные смолы — в цветном литье.

Олифа и льняное масло (А-1) высыхают вследствие окисления и полимеризации.

Жидкое стекло (В-1), представляющее собой водный коллоидный раствор силиката натрия, применяют для изготовления формовочных и стержневых смесей с последующей тепловой и химической сушкой форм и стержней. Основной характеристикой жидкого стекла является его модуль M — отношение числа грамм-молекул диоксида кремния SiO_2 к числу грамм-молекул оксида натрия Na_2O . Обычно $M = 2 \div 3$. Чем выше модуль, тем быстрее идет затвердевание смесей с жидким стеклом, но конечная прочность смеси тем выше, чем ниже модуль. Жидкое стекло с низким ($M = 2$), средним ($M = 2,5$) и высоким ($M = 3$) модулями применяют для форм и стержней, твердеющих соответственно при тепловой обработке, продувке углекислым газом и выдержке на воздухе.

Затвердевание жидкого стекла с высоким модулем характеризуется процессом последовательного перехода водного коллоидного раствора сначала в золь, а затем в твердый кремнегель. Жидкое стекло с низким модулем твердеет преимущественно с образованием геля бисиликата натрия ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2$).

Повышение податливости и улучшение выбиваемости жидкостекольных смесей достигают введением сахаросодержащих добавок (гидрола). Введение в смеси сложных эфиров органических и неорганических кислот (ацетатов глицерина) позволяет снизить необходимое количество жидкого стекла на 30 % и существенно увеличить выбиваемость смесей. Положительным свойством жид-

кого стекла является отсутствие вредных выделений во время заливки форм.

Древесный пек и канифоль (А-3), сульфитно-спиртовая брага (ССБ) и патока (Б-3) имеют относительно невысокую удельную прочность и чаще применяются совместно с другими материалами.

Широкое распространение на практике получили комбинированные связующие (А-2 и Б-2), которые получают растворением, смешиванием и эмульгированием. Растворение используют, когда связующие имеют одинаковую химическую природу и растворяются в одинаковых растворителях. Смешивать можно связующие разной химической природы (органические и неорганические), но обязательно водные с водными, а неводные — с неводными.

При эмульгировании дополнительно вводится поверхностно-активное вещество (ПАВ), которое, адсорбируясь на поверхности капель или частиц, препятствует соответственно их слиянию или сцеплению, т. е. разделению (расслоению) системы на две отдельные фазы. Эмульсии, полученные таким образом, могут представлять собой капли или частицы неводного связующего, распределенные в воде и стабилизированные каким-либо ПАВ, и капли воды, распределенные в неводном связующем. Примером эмульсии первого типа может служить связующее СП (группы Б-2), в котором капли окисленного петролятама (5 %), представляющего собой масло на основе нефтепродуктов, распределены в воде и стабилизированы сульфитно-спиртовой бардой (95 %), которая сама является связующим.

В связующих групп А-2 и Б-2 часто в небольших количествах содержится глина, придающая смесям прочность в сыром состоянии. Применение комбинированных связующих снижает расход дефицитных и дорогостоящих связующих и позволяет получать стержневые смеси заданной прочности в сухом и сыром состояниях, с высокой газопроницаемостью и минимальной газотворностью.

Для улучшения технологических, механических, теплофизических и других свойств в смеси вводят добавки. В смеси для стального литья вводят пылевидный кварц, который, располагаясь между зернами песка, уменьшает пористость смеси и увеличивает ее теплоаккумулирующую способность. Это приводит к более раннему образованию твердой корки на поверхности отливки и снижению механического и химического пригара. Уменьшение проходного сечения пор также способствует уменьшению пригара.

В формовочные смеси для чугуна, заливаемого во влажные формы, вводят каменноугольную пыль, которая во время заливки газифицируется и создает в форме более восстановительную атмосферу, препятствующую окислению металла и образованию на отливках пригара.

В формовочные смеси для ответственного чугунного литья с целью повышения поверхностной прочности сырых форм вводят до 0,1 % крахмалита (кукурузного крахмала), что снижает брак отливок по засорам.

С целью предотвращения воспламенения магниевых сплавов в формовочные смеси вводят добавку ВМ, в состав которой входят борная кислота, техническая мочеви́на и сернистый алюминий. На поверхности магниевого сплава образуются плотные пленки, защищающие его от окисления кислородом воздуха и парами воды из формы. В стержневые смеси с этой же целью добавляют серу (0,25—1 %). Выделяющиеся газообразные продукты снижают концентрацию кислорода и паров воды вокруг отливки и предохраняют ее от возгорания.

При изготовлении чугунных отливок в смеси для сухих форм добавляют опилки, которые при сушке уменьшаются в объеме, а при заливке металла выгорают, образуя дополнительные поры. В результате формы имеют повышенную газопроницаемость, податливость и выбиваемость.

Добавки можно вводить для повышения теплопроводности, текучести смесей, устранения их прилипания к модельной оснастке, а также в других целях. Поверхностно-активные вещества позволяют получать смеси с принципиально новыми свойствами. Так, например, введение в смеси с жидким стеклом ПАВ ДСРАС или контакта Петрова в количестве до 0,1 % переводит смесь из сыпучего в жидкоподвижное состояние за счет снижения поверхностного натяжения жидкой составляющей и образования в межзеренных пространствах песка мелкодисперсной пены. Жидкие смеси можно заливать в опоку или стержневой ящик без использования обычных формовочных и стержневых машин, уплотняющих смесь. Смесь затвердевает через 20—40 мин после введения в нее отвердителя, содержащего двукальциевый силикат $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$. Эти смеси благодаря своим качествам получили в настоящее время широкое применение.

§ 2. ФОРМОВОЧНЫЕ И СТЕРЖНЕВЫЕ СМЕСИ, ПРОТИВОПРИГАРНЫЕ ПОКРЫТИЯ

Формовочные смеси. Состав формовочных смесей определяется маркой литейного сплава, его температурой перед разливкой по формам, размерами и массой получаемых отливок, способом изготовления форм, характером производства и другими факторами (табл. 8).

Экономически целесообразно получать отливки в сырых формах. Сухие формы применяют при изготовлении крупных, массивных или сложных по конфигурации отливок в тех случаях, когда в сырых формах не удастся получить качественные изделия. Смеси для сырых форм имеют влажность 4—6 %, содержат 7—12 % глины прочносвязующей во влажном состоянии. Содержание глины может быть снижено до 4 % при использовании бентонитов. Предел прочности при сжатии сырых смесей обычно составляет $(0,3—0,8) 10^6$ Па.

В массовом производстве при изготовлении форм методом пресования под повышенным давлением и изготовлении безопочных форм с вертикальным разъемом применяют высокопрочные смеси, предел прочности которых при сжатии достигает $2,1 \cdot 10^6$ Па.

При получении отливок в сухих формах содержание прочносвязующей глины в высушенном состоянии доходит до 16 %, влажность смеси составляет 5—9 %.

Формовочные смеси готовят из различных песков и глин. Формовочные смеси для получения стальных отливок (температура заливки 1550°C) должны содержать пески классов 1К и 2К и глины группы T_1 с высокой термохимической устойчивостью (с низким содержанием примесей). При изготовлении крупных чугунных отливок (температура заливки 1350°C) можно использовать пески классов 3К и 4К и глины группы T_2 со средней термохимической устойчивостью (со средним содержанием примесей). Для мелких и средних чугунных отливок и отливок из цветных сплавов вместо кварцевых можно применять глинистые пески класса П, имеющие более низкую огнеупорность.

Составы и свойства

Сплавы	Состояние формы	Состав смеси, %					
		единой			облицовочной		
		Песок и глина	Отработанная смесь	Добавки	Песок и глина	Отработанная смесь	Добавки
Стали	Сырая	10—20	90—80	—	25—50	75—50	0—1 ССБ
	Сухая	—	—	—	50—100	50—0	0—20 пылевидного кварца, 0—1,5 ССБ
Чугуны	Сырая	5—15	95—85	0,5—1,5 каменного угля	20—60	80—40	2—8 каменного угля
	Сухая	—	—	—	40—60	60—40	0—4 спиллок
Медные	Сырая	7—10	93—90	1—1,5 мазута	20—60	80—40	1—1,5 мазута
	Сухая	—	—	—	20—40	80—60	—
Алюминиевые	Сырая	8—10	92—90	—	20—90	80—10	—
Магнелиевые	Сырая	5—10	95—90	4—8 фтористой присадки	—	—	—

Формовочные смеси подразделяют на единые, облицовочные и наполнительные. В массовом производстве применяют единые смеси, в единичном и мелкосерийном производстве для изготовления крупных форм — две смеси: облицовочную, наносимую на поверхность модели, и наполнительную, заполняющую остальной объем формы.

Единые смеси должны обладать высокими свойствами, потому что они соприкасаются с жидким металлом. Степень освежения единых смесей (5—15 %) значительно меньше, чем у облицовочных (20—100 %), так как вводимые в единую смесь свежие пески и глины при одинаковом их расходе распределяются по всему объему формы, а не только в облицовочном слое (см. табл. 8). Степень освежения смесей зависит от количества заливаемого в форму металла, его температуры, а также от безвозвратных потерь смеси в процессе производства отливок.

формовочных смесей

Зерновой состав песка	Содержание глины, %	Влажность, %	Газопроницаемость	Предел прочности, 10^6 Па	
				при сжатии сырых образцов	при растяжении сухих образцов
02А, 02Б	10—12	4—5	80—120	0,4—0,6	—
02Б, 0315А	7—15	6—8	70—120	0,5—0,7	0,8—1,5
01А—0315Б	8—19	4—6	30—100	0,3—0,7	—
02А—04А	12—16	6—8	60—100	0,5—0,8	0,8—2
016А, 01А	8—12	4—5,5	30—50	0,3—0,5	—
016А, 01А	10—15	5,5—7	30—50	0,4—0,6	0,8—1,2
016А, 01А	8—10	4,5—5,5	20—40	0,3—0,5	—
01А, 0063А	5—6	—	20—40	0,4—0,8	—

Облицовочный слой смеси (толщина 40—100 мм), непосредственно контактирующий с заливаемым в форму металлом, подвергается воздействию высоких температур, воспринимает гидравлический удар и давление металла, обеспечивает необходимую конфигурацию и чистоту поверхности. Из этих соображений облицовочные смеси должны обладать повышенными физико-механическими свойствами, что достигается введением в их состав большого количества свежих материалов (песков и глин).

Наполнительные смеси отделены от металла слоем облицовочной смеси, поэтому к ним в основном предъявляют требования по газопроницаемости и прочности, которые должны быть не ниже, чем у облицовочных смесей. В наполнительные смеси свежие материалы не вводят.

Приведенные в табл. 8 сведения о составе и свойствах смесей являются средними ориентировочными. Эти данные могут уточ-

няться в зависимости от конкретных производственных условий.

Стержневые смеси. К стержневым смесям предъявляют более высокие требования, чем к формовочным в отношении прочности, газопроницаемости, газотворности, податливости, выбиваемости и огнеупорности, так как во время заливки и охлаждения металла в форме стержни в большей мере соприкасаются с металлом и интенсивнее прогреваются. Стержневые смеси выбирают в зависимости от конфигурации и размеров стержней, положения их в форме, заливаемого сплава и толщины стенки отливки.

Стержни подразделяют на пять классов. К первому классу относят стержни сложной конфигурации, с очень тонкими сечениями, имеющие небольшое число тонких знаков. Стержни со всех сторон окружены металлом. В высушенном состоянии они должны иметь высокую прочность и газопроницаемость. Это достигается введением в смесь небольшого количества связующего А-1 (см. табл. 7).

Стержни второго класса наряду с тонкими ребрами и выступами имеют массивные части и развитые знаки. Значительная часть поверхности соприкасается с металлом. Вследствие более легкого отвода газов из стержней через знаки допустимо большее количество связующего. Поэтому можно применять связующие А-2. Для придания стержням достаточной прочности во влажном состоянии в смеси вводят 3—5 % глины.

Стержни третьего класса имеют конфигурацию средней сложности. Обычно это центровые стержни. Они должны обладать средней прочностью во влажном и высушенном состояниях. Эти требования выполняются при введении в смесь комбинированных связующих А-2 и Б-2. Можно вводить связующие А-3, Б-3 совместно с глиной.

К четвертому классу относят стержни несложной конфигурации. В смесях используют водные связующие классов Б и В.

Стержни пятого класса — массивные стержни, образующие большие полости в крупных отливках. Основным связующим в смесях является глина (7—10 %), так как стержни мало прогреваются и органические материалы в них не сгорают и не разлагаются. Для увеличения податливости в смеси добавляют опилки.

Для стержней первого и второго классов применяют кварцевые пески; для стержней третьего и четвертого классов можно использовать менее дефицитные глинистые пески и вводить до 60 % отработанной смеси.

При изготовлении стержней, твердеющих в нагреваемой или холодной оснастке при наличии катализатора, используют обогащенные пески.

Предел прочности при сжатии смеси во влажном состоянии для стержней первого—пятого классов возрастает от $(0,03—0,06) 10^6$ до $(0,2—0,35) 10^6$ Па, предел прочности при растяжении высушенной смеси снижается с $(7—10) 10^5$ до $(0,8—1,5) 10^5$ Па.

Для смесей, твердеющих в нагреваемой оснастке, предел прочности при растяжении равен $20 \cdot 10^5$ Па (смеси с 2,7 % смолы КФ-90) и более.

Приготовление формовочных и стержневых смесей. Приготовление смесей предусматривает подготовку исходных формовочных материалов, отработанных смесей и приготовление самих смесей из этих материалов.

Пески, поступающие на склад литейного цеха, сушат при температуре $\sim 250^\circ\text{C}$ в печах барабанного типа или в установках для сушки в кипящем слое (рис. 24).

Исходный песок подается на решетку 4. Дымовые газы при температуре 1000°C направляются под решетку под избыточным давлением и образуют с песком пневмокипящий слой. Интенсивное перемешивание обеспечивает эффективный теплообмен между горячими газами и частицами песка, которые быстро высушиваются. Расширение конического резервуара 3 способствует снижению скорости движения песчинок и их оседанию. Сухой песок вытекает через желоб 5, а влажный — непрерывно поступает по транспортеру 1 через воронку 2.

Высушенный песок охлаждается до нормальной температуры и просеивается с целью отделения комьев, гальки и различных посторонних включений через сита с размером ячеек 3—5 мм. Для этого используют барабанные, конические сита и сита с плоским полотном.

Глину подвергают сушке в барабанных печах при температуре $200\text{—}250^\circ\text{C}$ и размельчению в два приема: дроблению на куски размером 15—25 мм в дробилках (щековых, вальцовых, молотковых) и размолу в мельницах (шаровых, молотковых) до частиц размером менее 0,1 мм с последующим просевом на ситах.

В формовочные смеси целесообразно вводить не порошковую глину, а глинистую суспензию. Суспензия (40 % глины и 60 % воды), приготовленная в бегунах или лопастных смесителях, подается по трубопроводу к местам приготовления формовочных смесей. Этот способ позволяет снизить расход глины на 30 %, исключить сушильное, дробильно-размольное, просеивающее оборудование и существенно улучшить условия работы в результате устранения источников выделения пыли и теплоты.

Угольный порошок готовят на том же дробильно-размольном оборудовании, что и порошковую глину. Остальные фор-

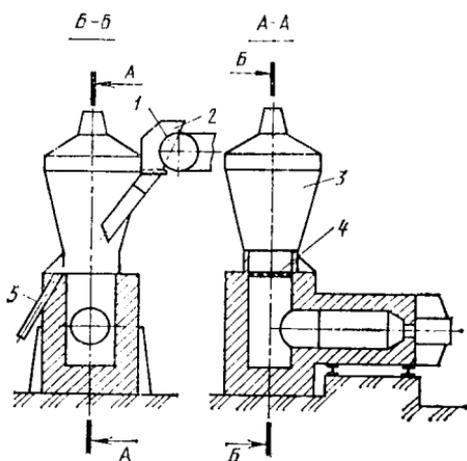


Рис. 24. Установка для сушки песка в кипящем слое

мовочные материалы (связующие, пылевидный кварц, циркон и др.) поступают в литейные цехи в готовом виде и специальной подготовки не требуют.

Отработанную смесь, выбитую из опок, перерабатывают и после этого подают в смесеприготовительное отделение. Отработанная смесь, получаемая после выбивки сухих форм, содержит твердые комья, которые разминают между гладкими валками.

Для удаления из смеси металлических включений (брызг металла, шпилек, каркасов стержней) применяют магнитный сепаратор (рис. 25). Внутри ведущего шкива 1 ленточного конвейера 2, подающего отработанную смесь от выбивной решетки, находится многополюсный электромагнит. Металлические частицы, притягиваясь к магниту, прижимаются к ленте конвейера и падают только тогда, когда лента сходит со шкива. Немагнитный материал — отработанная смесь 4 сыпается с ленты отдельным потоком раньше металлических частиц. Металлические частицы собираются в емкости 3, а отработанная смесь передается ленточным транспортером на последующую переработку.

После магнитной сепарации отработанная смесь просеивается через цилиндрические или конические сита с размерами ячеек 6—10 мм для отделения немагнитных включений. Смесь, охлажденная до 35 °С, направляется в смесеприготовительное отделение как компонент единых и облицовочных смесей.

Отработанные стержневые смеси подвергают специальной переработке, называемой регенерацией, целью которой является получение продукта (регенерата), используемого в качестве заменителя свежего формовочного песка, входящего в состав стержневой смеси. Отработанная стержневая смесь разминается, комья распадаются на отдельные зерна песка и пылевидные частицы, образованные растрескавшимися зернами песка и остатками пленок связующих. После этого смесь классифицируют по размерам зерен

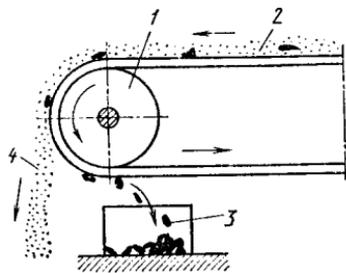


Рис. 25. Магнитный сепаратор

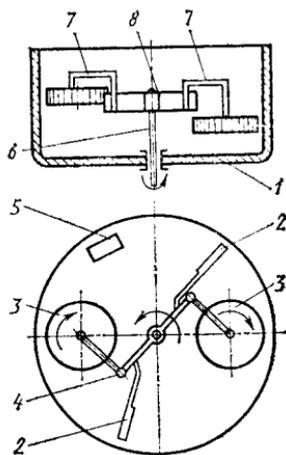


Рис. 26. Смешивающие бегуны с горизонтально расположенными катками

в воздушном потоке, постепенно изменяющем скорость своего движения (сухая регенерация) или после смешения с водой в специальных отстойных чанах (мокрая регенерация). Регенерацию применяют после экономического обоснования, так как она требует значительных производственных площадей и связана с большими затратами.

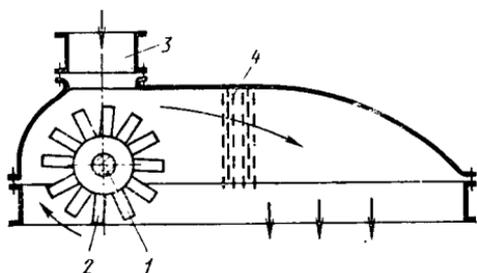


Рис. 27. Аэратор

Приготовление формовочных смесей включает следующие операции: дозирование, перемешивание компонентов, увлажнение, вылеживание и разрыхление.

Сущность процесса перемешивания состоит в том, чтобы из компонентов получить однородную смесь, все зерна песка которой были бы покрыты тонким, равномерным слоем увлажненной глины или другого связующего. Перемешивание проводят в специальных смесителях, наиболее распространенными из которых являются смешивающие бегуны с вертикальными и горизонтальными катками.

На рис. 26 приведена схема бегунов с горизонтальными катками. На траверсе 8, укрепленной на вертикальном валу 6, находятся маятники 7, на которых подвешены катки 3. Маятники соединены с траверсой шарниром 4. При вращении вала катки под действием центробежных сил отклоняются к борту чаши 1. Смесь поднимается со дна чаши вращающимися вместе с траверсой плужками 2 и попадает под катки, которые разминают комья и перемешивают смесь. Готовая смесь удаляется из чаши через люк 5. Производительность бегунов 20 м³/ч и более. Продолжительность приготовления одного замеса составляет 1,5—2,0 мин.

После переработки в бегунах смеси, содержащие глину, поступают в бункеры-отстойники на вылеживание в течение 2—6 ч. Это время необходимо для образования водных оболочек вокруг глинистых частиц и устранения неравномерности распределения влаги в смеси.

После бункеров-отстойников смесь разрыхляют в аэраторах или дезинтеграторах, что обеспечивает высокую газопроницаемость и однородность уплотнения смеси в формах.

В аэраторе (рис. 27) вращающиеся на валу 1 лопасти 2 подхватывают непрерывно поступающую через загрузочное отверстие 3 смесь и бросают ее на свободно висящие цепи 4 или прутья, с которых она падает в разрыхленном состоянии. Далее по ленточным конвейерам формовочная смесь подается в бункеры над формовочными машинами.

Последовательность приготовления смесей показана на рис. 28.

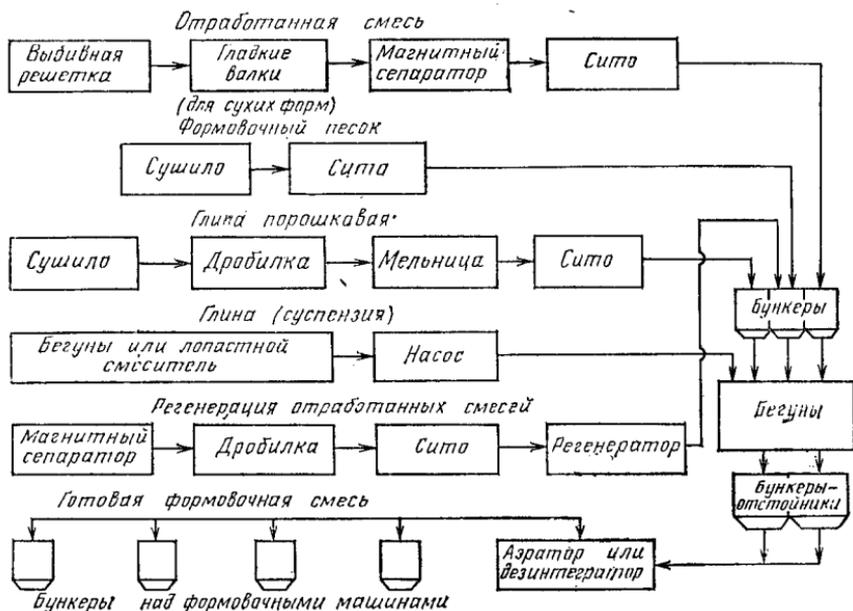


Рис. 28. Схема приготовления формовочной смеси

Противопригарные покрытия. Для улучшения чистоты поверхности отливок на рабочую поверхность форм и стержней наносят специальные противопригарные покрытия. На поверхности полостей форм, заливаемых в сыром состоянии, наносят припылы. Формы для стальных отливок припыливают пылевидным кварцем, для чугунных отливок — серебристым графитом и тальком.

Сухие формы и стержни покрывают противопригарными покрытиями, представляющими собой суспензию пылевидного огнеупорного материала в воде с добавлением связующего для придания прочности слою покрытия и стабилизирующего вещества, препятствующего расслоению суспензии. Нанесенный слой краски уменьшает шероховатость поверхности формы, закрывает поры между зернами песка, препятствуя прониканию в них жидкого металла и его оксидов. В результате поверхность отливки получается более гладкой, чистой и без пригара.

Формы для отливок из чугуна покрывают углеродсодержащими покрытиями, например, имеющими состав, %: 58,5 графита скрытокристаллического, 3,5 бентонита, 10 сульфитной барды, 28 воды. Плотность этой суспензии 1400 кг/м³. В противопригарные покрытия для стальных отливок обычно входят пылевидные кварц, циркон, магнезит, а для отливок из цветных сплавов тальк.

Покрытия наносят на горячие формы и стержни или на холодные с последующей их подсушкой. Применяют и самовысыхающие покрытия на органических растворителях. В ряде случаев можно

использовать специальные покрытия, например для предотвращения поверхностного науглероживания отливок из коррозионно-стойких сталей. Известно применение покрытий для модифицирования и поверхностного легирования.

ГЛАВА 5. ИЗГОТОВЛЕНИЕ ФОРМ И СТЕРЖНЕЙ

Изготовление разовых литейных форм называют *формовкой*. Это трудоемкий и ответственный этап всего технологического цикла изготовления отливок, который в значительной степени определяет их качество. При формовке выполняют следующие технологические операции:

уплотнение смеси, позволяющее получить точный отпечаток модели в форме и придать ей необходимую прочность в сочетании с податливостью, газопроницаемостью и другими свойствами;

устройство в форме вентиляционных каналов, облегчающих выход из полости формы образующихся при заливке газов;

извлечение модели из формы;

отделку и сборку формы, включая установку стержней.

Разовые литейные формы позволяют получать практически любые по конфигурации, сложности и массе отливки. В зависимости от размеров, массы и толщины стенки отливки, а также марки литейного сплава его заливают в сырые, сухие или химические твердеющие формы. В сырых формах изготавливают мелкие и средние отливки. В других случаях перед сборкой полуформы высушивают на всю глубину или на 20—30 мм от поверхности, обеспечивают химическое твердение смеси в опоке. Литейные формы делают вручную, на формовочных машинах, полуавтоматических и автоматических линиях.

§ 1. РУЧНАЯ ФОРМОВКА

Несмотря на механизацию и автоматизацию производственных процессов, изготовление форм вручную часто наиболее целесообразно в условиях единичного, а иногда и мелкосерийного производства. Доля отливок, получаемых в формах, изготовленных таким образом, в настоящее время составляет 20 %. Существует множество технологических вариантов формовки, наиболее распространенным из которых является получение форм в парных опоках по разъемной модели. Разъемную модель применяют, как правило, в тех случаях, когда модель не имеет плоской поверхности (рис. 29, а).

На модельную плиту 4 устанавливают нижнюю половину 3 модели и нижнюю опоку 2 рабочей плоскостью вниз (рис. 29, б). На модель наносят слой облицовочной смеси толщиной 40—100 мм, который слегка уплотняют. Затем опоку заполняют наполнитель-

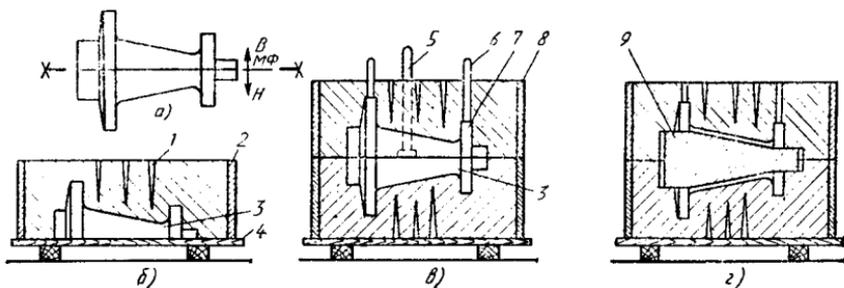


Рис. 29. Изготовление формы в двух опоках по разъемной модели

ной смесью и уплотняют ручной или пневматической трамбовкой. Излишек формовочной смеси срезают линейкой вровень с кромкой опоки, делают наколы 1, улучшающие газопроницаемость формы. Опоку с заформованной в ней половиной модели поворачивают на 180° и вновь устанавливают на модельную плиту. На нижней половине 3 модели фиксируют ее верхнюю половину 7 (рис. 29, в), устанавливают модели стояка 5 и других элементов литниковой системы, выпора 6. Плоскость разъема формы посыпают разделительным песком и на нижнюю опоку устанавливают верхнюю 8. Модель и элементы литниковой системы покрывают слоем облицовочной смеси толщиной 40—100 мм, слегка обжимают и опоку заполняют наполнительной смесью. После уплотнения смеси трамбовкой срезают излишки смеси, делают вентиляционные наколы и извлекают модели стояка и выпора. Верхнюю полуформу снимают, поворачивают на 180° и извлекают с помощью специального подъемника половины моделей отливки и литниковой системы. Затем в нижнюю полуформу устанавливают стержень 9, который оформляет внутреннюю полость отливки, и на нижнюю полуформу с помощью штырей устанавливают верхнюю полуформу (рис. 29, г). После скрепления опок или нагружения форма считается подготовленной к заливке. Иногда при изготовлении сложных отливок одна плоскость разъема не позволяет извлечь модель из верхней и нижней полуформ. В этих случаях применяют формовку в трех и большем числе опок, т. е. форма имеет две и больше поверхностей разъема. В ряде случаев вместо дополнительного разъема на модели делают отъемные части или устанавливают наружные стержни. Схема формовки по модели с отъемными частями показана на рис. 30.

Формы для несложных отливок могут быть изготовлены по неразъемной модели, допускающей ее извлечение из формы без разрушения последней. Примененке неразъемных моделей сложных конфигураций возможно также при использовании специальных приемов (подрезки, фальшивой опоки и т. д.). В этих случаях последовательность операций по изготовлению собственно формы аналогична описанной выше.

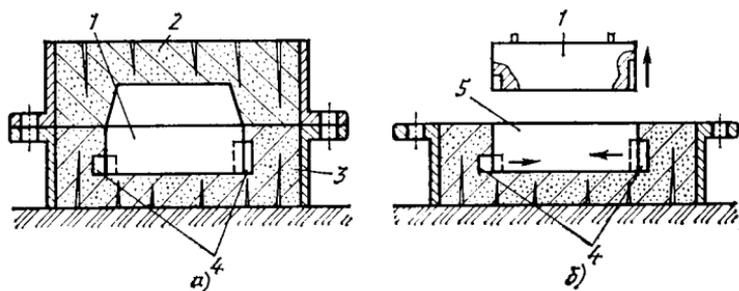


Рис. 30. Формовка по модели с съемными частями:

a — изготовленная форма; *б* — извлечение модели и съемных частей; 1 — модель; 2 — верхняя полуформа; 3 — нижняя полуформа; 4 — съемные части модели; 5 — полость нижней полуформы

Формы для крупных уникальных отливок массой в несколько десятков, а иногда и сотен тонн, как правило, изготовляют в специальных ямах (кессонах), дно которых находится ниже уровня пола цеха. Стенки и дно кессонов для предупреждения попадания в них грунтовой воды облицовывают бетоном или железобетоном. Формовку в почве применяют для изготовления отливок, не требующих высокой точности. При этом формовочную смесь уплотняют вокруг модели с помощью пневматических трамбовок или пескостетом, а при изготовлении небольших отливок модель вдавливают в заранее подготовленный слой формовочной смеси.

Формовка в почве может быть открытой и закрытой. В обоих случаях первой операцией является подготовка почвы, или, как говорят, подготовка постели. Применяют формовку по мягкой и твердой постели. При изготовлении крупных отливок, например деталей металлургического оборудования, формовку в почве осуществляют по твердой постели. Для этого в полу формовочного участка выкапывают яму шириной и глубиной на 250—500 мм больше соответствующих размеров модели. На дно ямы насыпают и уплотняют слой крупного шлака, который накрывают рогожей или слоем соломы, устанавливают вентиляционные трубы для отвода газов из формы, засыпают и уплотняют наполнительную смесь (уплотняют слои по 60—80 мм). Засыпку наполнительной смеси заканчивают, когда глубина ямы будет меньше высоты модели на 30—80 мм. Затем делают вентиляционные каналы и засыпают облицовочную смесь. После приготовления твердой постели в нее осаживают модель (или нижнюю полумоделю в случае формовки по разъемной модели), горизонтальность ее расположения проверяют уровнем. Края формы слегка смачивают водой, модель расталкивают, чтобы обеспечить ее легкое извлечение из формы, и извлекают. Затем форму отделяют: наносят противопопригарное покрытие, сушат специальными переносными сушилами, а после охлаждения устанавливают стержни. Если форма сделана по разъемной модели, то после осаживания нижней половины модели в почву или уплотнения смеси трамбовками вокруг модели плос-

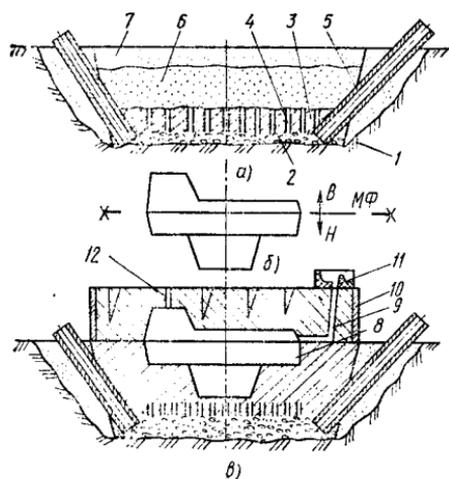


Рис. 31. Закрытая формовка в почве по твердой постели.

a — приготовление твердой постели; *б* — модель; *в* — собранная форма; 1 — яма; 2 — кокс или шлак; 3 — слой уплотненной наполнительной смеси; 4 — вентиляционные наконечники; 5 — вентиляционные трубы; 6 — слой наполнительной смеси; 7 — слой облицовочной смеси; 8 — полость формы; 9 — литниковый ход; 10 — опока; 11 — литниковая чаша; 12 — выпор

кость разреза посыпают сухим разделительным песком, устанавливают верхнюю половину модели, модель литниковой системы и опоку. Засыпают и уплотняют формовочную смесь. По окончании формовки верхнюю полуформу снимают,

извлекают модель и готовят форму к заливке (рис. 31). Последовательность изготовления формы при формовке в кессонах такая же.

Формовку по шаблону применяют в единичном производстве для получения отливок, имеющих форму тел вращения (различных шкивов, цилиндров и т. д.). В этом случае отпадает необходимость в дорогостоящих моделях, но в то же время требуются формовщики высокой квалификации. Формы получают выгребанием формовочной смеси закрепленными на специальных приспособлениях профильными досками, имеющими конфигурацию будущей отливки или ее частей. Такие профильные доски называются *шаблонами*. В настоящее время этот метод используют редко.

§ 2. МАШИННАЯ ФОРМОВКА

Основную часть форм получают машинной формовкой. Машинные позволяют механизировать две основные операции формовки (уплотнение смеси, удаление модели из формы) и некоторые вспомогательные (устройство литниковых каналов, поворот опок и т. д.). При механизации процесса формовки улучшается качество уплотнения, возрастает точность размеров отливки, резко повышается производительность труда, облегчается труд рабочего и улучшаются санитарно-гигиенические условия в цехе, уменьшается брак.

Процесс изготовления форм в парных опоках на машинах идет следующим образом. Формовочная смесь каким-либо транспортным средством (системой ленточных конвейеров или электротельфером с бадьей) подается в бункеры, установленные над машинами. Пустые верхняя и нижняя опоки с места выбивки форм подаются к машинам по рольгангам. Как правило, нижнюю полуформу изготавливают на одной машине, а верхнюю — на другой. На модель

с модельной плитой, закрепленную на столе машины, устанавливают опоку, далее с помощью дозатора опоку заполняют смесью из бункера. Затем смесь уплотняют. Готовую полуформу снимают с машины и подают на приемное устройство, чаще всего рольганг, где полуформу отделяют (устраняют дефекты, делают вентиляционные каналы, наносят покрытие, если это необходимо, и т. д.) и затем транспортируют на сборку. Если форма должна быть высушена, то полуформы направляют в сушило и только после остывания и отделки — на сборку.

В массовом производстве мелких отливок иногда применяют безопочную формовку. Этот способ правильнее было бы называть способом безопочной заливки, так как формовку осуществляют в специальных опоках, которые после изготовления формы снимают. Способ позволяет значительно сократить парк опок и облегчить выбивку отливок. Съёмные опоки целесообразно применять для форм, изготавливаемых прессованием под высоким давлением.

Формовочные машины классифицируют по методам уплотнения смеси, удаления модели из формы и приведения в действие.

По методам уплотнения формовочной смеси различают следующие типы формовочных машин:

прессовые с давлением прессования до $5 \cdot 10^5$ Па и более 10^6 Па; встряхивающие;

пескометы;

пескодувные;

пескострельные;

импульсные;

вакуумные;

специальные (уплотнение формовочной смеси отличается от перечисленных методов).

Прессовые машины могут быть с верхним и нижним прессованием. При верхнем прессовании (рис. 32, а) модельную плиту 2 с моделью 3 укрепляют на столе 1. Устанавливают опоку 4 высотой H с наполнительной рамкой 5 высотой h , затем в них насыпают формовочную смесь. Стол с опокой поднимается, и прессовая колодка 6, входя внутрь наполнительной рамки 5, уплотняет смесь. Прессование заканчивается в момент, когда вся формовочная смесь, находящаяся в наполнительной рамке, перейдет в опоку. Высота прессовой колодки и высота наполнительной рамки одинаковые. Степень уплотнения ρ смеси при верхнем прессовании неодинакова по высоте опоки. По мере удаления от прессовой колодки степень уплотнения уменьшается до определенного предела и затем несколько возрастает из-за сопротивления, которое оказывает жесткая плоскость модельной плиты передвижению смеси в процессе уплотнения. С увеличением высоты опоки увеличивается неравномерность уплотнения смеси. По этой причине высота опок не может превышать 250 мм.

В машинах с нижним прессованием (рис. 32, б) роль наполнительной рамки выполняет углубление h в неподвижном столе 7.

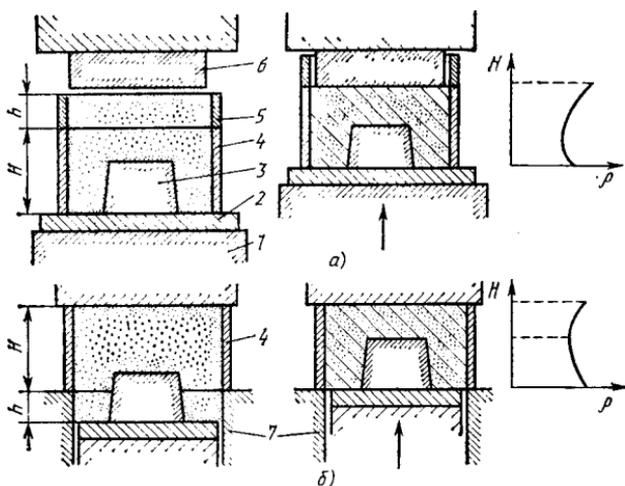


Рис. 32. Схемы верхнего (а) и нижнего (б) прессования и изменение плотности смеси по высоте опоки

По сравнению с верхним прессованием максимальная степень уплотнения смеси достигается у модели. Этот вариант технологически более благоприятен, однако такие машины обладают худшими эксплуатационными качествами.

В некоторых машинах прессование осуществляется одновременно с вибрацией. Песчинки смеси совершают колебания с малой амплитудой и большой частотой, трение между ними и о боковые стенки опоки уменьшается. В результате прессование происходит эффективнее, смесь уплотняется равномернее. В этом случае можно применять более высокие опоки.

Прессовые машины, работающие под высоким давлением ($2 \cdot 10^6$ Па), позволяют уплотнять смеси в высоких опоках, которые ранее использовали на встряхивающих машинах, работающих с большим шумом. Прочность формовочной смеси при этом способе увеличивается за счет сцепления зерен песка, а не за счет сил связи между водными оболочками вокруг зерен песка. Поэтому на этих машинах можно использовать смеси с пониженной влажностью (1,5—3%), что уменьшает брак отливок по газовым раковинам. Высокое давление прессования позволяет получать более точный отпечаток и изготавливать отливки с меньшими припусками на механическую обработку. С повышением плотности смеси увеличивается ее теплопроводность, ускоряется охлаждение отливки. Связь между плотностью смеси в форме и давлением прессования выражается формулой $\rho = \rho_1 + n \lg p$, где ρ_1 — средняя плотность смеси; p — давление прессования, $p = 10^5$ Па; n — изменение плотности смеси при изменении давления на 10^5 Па.

Более равномерное уплотнение формовочной смеси как по высоте, так и по поверхности формы достигается при использовании

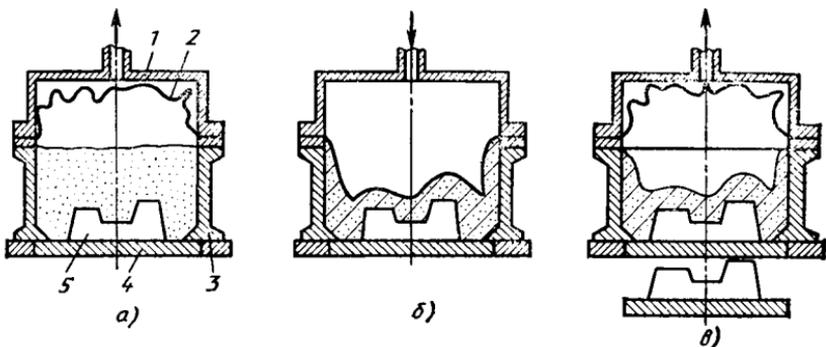


Рис. 33. Уплотнение формочной смеси эластичной диафрагмой

в качестве уплотняющего органа машины эластичной диафрагмы (рис. 33) или многоплунжерной прессовой головки (рис. 34).

В первом случае после заполнения установленной на модельной плите 4 опоки формочной смесью к верхнему торцу 3 опоки прижимается кожух 1 с диафрагмой 2, в полость между которыми подается сжатый воздух (рис. 33, а). Диафрагма растягивается и равномерно уплотняет формочную смесь (рис. 33, б). Давление воздуха передается прежде всего в места, допускающие наибольшее сжатие формочной смеси и расположенные над низкими частями модели 5. Поверхность диафрагмы принимает волнообразную форму, в результате чего ее площадь превышает площадь опоки примерно на 40 % и соответственно на 40 % возрастает общее давление на форму. Давление сжатого воздуха, а следовательно, и прессования равно $(5 - 6) \cdot 10^5$ Па. Уплотнив формочную смесь в опоке, диафрагму извлекают (рис. 33, в), создавая в пространстве над ней разрежение.

Указанный способ обеспечивает высокую и равномерную плотность смеси во всех частях формы и позволяет изготавливать формы размером до $9000 \times 3000 \times 1500$ мм как из обычных песчаных смесей, так и из быстротвердеющих смесей с последующей их продук-

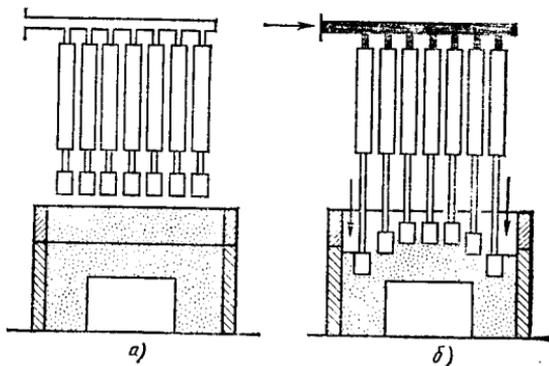


Рис. 34. Уплотнение формочной смеси прессовой многоплунжерной головкой

кой CO_2 , который подается в полость между диафрагмой и формовочной смесью. Недостатком метода является низкая стойкость диафрагмы, которая выдерживает до 60 000 формовок.

Метод прессования многоплунжерной головкой является модификацией диафрагменного прессования (рис. 34, а). В систему прессования подается масло, давление которого может регулироваться в широких пределах. Цилиндры всех плунжеров соединены друг с другом. Перетекание масла между ними и приводит к тому, что на каждую прессующую колодку (башмак) передается одинаковое по величине давление. Ход перемещения башмака зависит от сопротивления, оказываемого уплотняемой частью формовочной смеси (см. рис. 34, б). Чем оно выше, тем на меньшую высоту перемещается башмак. В результате плотность формовочной смеси в опоке оказывается примерно одинаковой.

Встряхивающие машины. На столе 3 машины (рис. 35, а) укреплена плита 2 с моделью, на которую устанавливают опоку 1 и заполняют ее формовочной смесью. Стол поднимается под давлением воздуха на 30—80 мм. После того как поршень 4 дойдет до отверстия 5, сжатый воздух выйдет, и стол, падая, ударится о преграду. Уплотнение происходит под действием силы тяжести смеси. Число ударов стола о преграду — борта пневматического цилиндра — составляет 30—50 в минуту.

При встряхивании наиболее сильно уплотняются нижние слои, непосредственно прилегающие к модельной плите. По мере удаления от плиты масса вышележащего слоя смеси уменьшается, а следовательно, уменьшается степень уплотнения. Верхний слой смеси остается практически неуплотненным. Характер плотности смеси по высоте опоки при встряхивании описан кривой 1 на рис. 35, б. Верхние слои смеси в опоках дополнительно уплотняют подпрессовкой. С этой целью на машинах устанавливают специальные устройства. Характер распределения плотности смеси по высоте опоки после встряхивания и подпрессовки описывается кривой 2 на рис. 35, б.

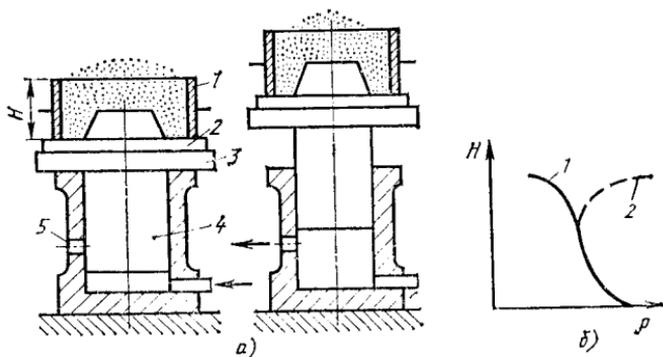


Рис. 35. Схема работы встряхивающей формовочной машины и распределение степени уплотнения смеси по высоте опоки

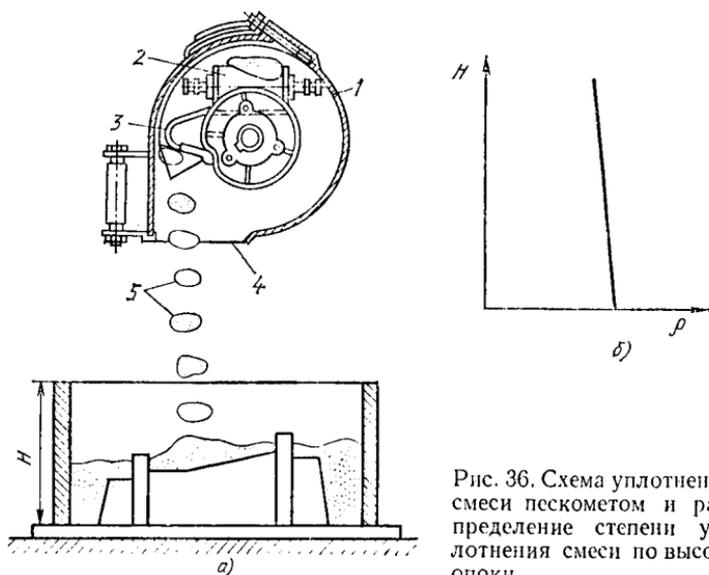


Рис. 36. Схема уплотнения смеси пескометом и распределение степени уплотнения смеси по высоте опоки

Пескометы. Основной рабочей частью пескомета является головка. Внутри ее кожуха 1 с большой скоростью вращается ротор с одной или двумя лопатками 3 (рис. 36, а). Скорость вращения ротора 1500 об/мин. Через отверстие 4 в кожухе 1 лопатки выбрасывают смесь 5, которая в головку подается транспортером 2. При падении за счет силы тяжести смесь уплотняется.

Головку монтируют на подвижной консоли пескомета, что дает возможность перемещать ее в вертикальной и горизонтальной плоскостях. Формы или стержни с помощью пескометов изготавливают двумя способами: перемещением пескомета относительно неподвижных опок или стержневых ящиков и перемещением опок или стержневых ящиков с помощью транспортных устройств относительно неподвижно установленного пескомета. Степень уплотнения смеси по высоте опоки практически одинаковая (рис. 36, б). Производительность пескометов составляет обычно не менее 10—12 м³/ч формовочной смеси, поэтому их целесообразно применять для изготовления средних и крупных форм и стержней. Пескометы только заполняют опоки смесью и уплотняют ее. Другие операции формовки они не выполняют.

Пескодувные машины. Формовочную (стержневую) смесь вдвуют в опоку (стержневой ящик) под большим давлением. Машина имеет пескодувный резервуар 3, периодически заполняемый смесью из бункера 9. Вибратор 10 предусмотрен для предупреждения застывания смеси в бункере. Заполненный резервуар перемещается цилиндром 6 по рольгангу 7 на рабочую позицию (рис. 37, а). При этом бункер 9 перекрывается шиберным затвором 8. Стержневой ящик 1 прижимается столом 2 к вдвунной плите 4. Сжатый

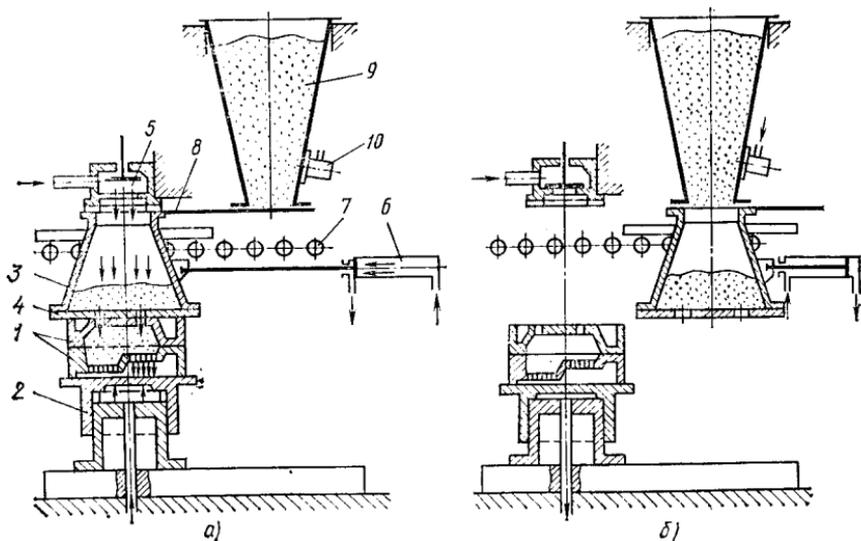


Рис. 37. Схема работы пескодувной машины:

a — заполнение пескодувного резервуара смесью; *б* — наддув смеси в стержневой ящик

воздух через распределитель 5 поступает в пескодувный резервуар и через вдвунные отверстия выносит песчано-воздушную массу в полость опоки и уплотняет ее. В опоке имеются отверстия (венты), закрытые сеткой и предназначенные для выхода воздуха из полости опоки. В основном смесь уплотняется за счет перепада давления в верхней части ящика, у вдвунных отверстий и вент (внизу, сбоку ящика). Если изготавливаемый стержень имеет сложную конфигурацию, то венты следует располагать в труднодоступных для смеси местах ящика.

Пескострельные машины. Пескострельные машины являются разновидностью пескодувных. Смесь из бункера 1 через шибер 2 подается в рабочий резервуар 3 и уплотняется при мгновенном перемещении из пескострельного резервуара через вдвунное отверстие в стержневой ящик (опоку) под давлением воздуха. Сжатый воздух из резервуара 8 (рис. 38) через быстродействующий клапан 9 большого сечения поступает в рабочий резервуар 3. Давление в резервуаре мгновенно повышается и ударно действует на смесь, выбрасывая ее через вдвунное отверстие 6 в полость стержневого ящика 5. Сопло (вдвунное отверстие) обязательно должно быть конической формы, чтобы воздух не прорвался в стержневой ящик и не ухудшил качество уплотнения смеси. Отверстия 7 во вдвунной плите 4 необходимы для удаления воздуха, вытесняемого смесью из стержневого ящика. В стержневом ящике венты, как правило, отсутствуют, что в значительной степени удешевляет конструкцию ящика.

Рис. 38. Схема работы пескострельной машины

При этом не происходит образования воздушно-песчаной смеси. Отсутствие песчано-воздушной массы резко снижает абразивное действие потока смеси на оснастку, что позволяет применять деревянные ящики. На пескострельных машинах в нашей стране и за рубежом изготовляют преимущественно стержни.

Импульсные машины. Уплотнение смеси происходит за счет удара воздушной (газовой) волны.

Опока 3, установленная на модельной плите 5, после заполнения формовочной смесью подводится под импульсную головку — рабочий орган машины (рис. 39, а). Сжатый воздух под давлением (6 — 10) 10^6 Па через рассекатель 1 с большой скоростью поступает в полость формы. Под действием удара воздушной волны формовочная смесь 2 уплотняется в течение 0,02—0,05 с. Оставшийся воздух через венты 4 удаляется. Верхние слои формовочной смеси уплотняют подпрессовкой с помощью плиты 6 (рис. 39, б).

При использовании обычных песчано-глинистых смесей поверхностная твердость формы достигает 89—94 единиц. Максимальное уплотнение смеси соответствует разъему полуформы. Степень уплотнения регулируется исходным давлением воздуха в импульсной головке. Этот метод формовки позволяет использовать и смеси повышенной прочности (до 0,2 мПа). Колебания свойств смесей в заводских условиях практически не влияют на процесс формообразования. Улучшение технологических параметров литейной формы повышает геометрическую точность отливок, снижает брак, улучшает санитарно-гигиенические условия труда за счет полного устранения вибрации и шума. Импульсную фор-

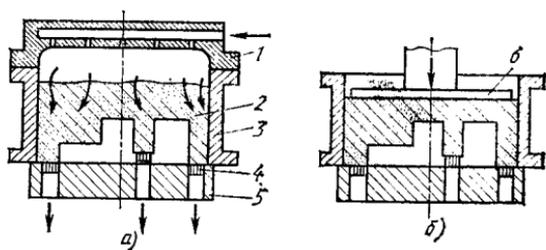
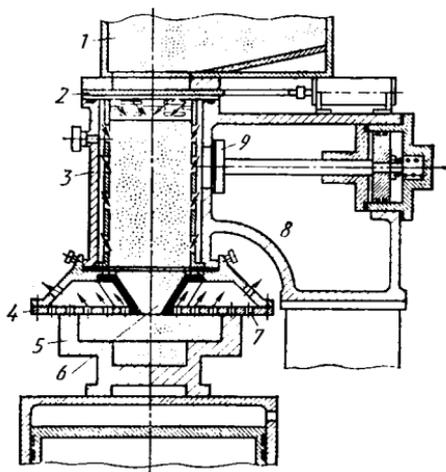


Рис. 39. Импульсное уплотнение формовочной смеси с последующей подпрессовкой

мовку можно применять для изготовления отливок различной номенклатуры в опоках размерами до $3000 \times 2000 \times 2500$ мм.

Вакуумные машины. Изготовление форм основано на формообразовании и придании им определенной прочности за счет разности давлений с внешней стороны формы (атмосферного) и внутри, между частями песка. Модель 4 и модельную плиту 5, соединенную вентями 3 с камерой 6, покрывают термопластичной пленкой 2, предварительно подогретой до температуры размягчения с помощью электрических нагревателей 1 (рис. 40, а). После накрытия модели пленкой в камере 6 создается вакуум, глубина которого зависит от размера форм. Под действием вакуума пленка

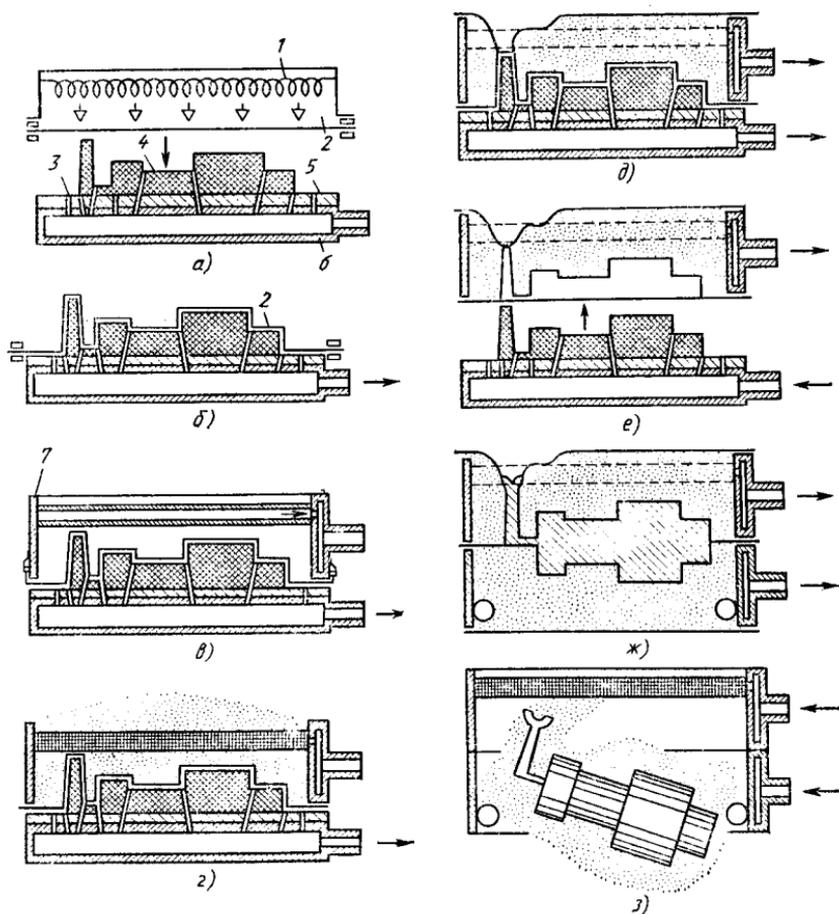


Рис. 40. Схема вакуумной формовки:

а — нагрев термопластичной пленки и нанесение ее на модель; б — модель, покрытая пленкой; в — установка опоки; г — заполнение опоки песком; д — накрывание полуформы пленкой и создание разрежения в полости формы; е — создание давления под моделью и извлечение модели из формы; ж — залитая металлом форма и затвердевание отливки; з — удаление отливки из формы

прилипают к модели и подмодельной плите (рис. 40, б), на которую устанавливают опоку 7 (рис. 40, в) специальной конструкции с полыми стенками и засыпают кварцевый песок или другой огнеупорный материал (рис. 40, г). Песок уплотняется вибрацией. После уплотнения верхняя поверхность опоки перекрывается пленкой (рис. 40, д) и в опоке образуется вакуум. Затем при сохранении вакуума в изготовленной полуформе в камере 6 создается небольшое давление, и модель извлекается (рис. 40, е). Аналогично изготавливают вторую полуформу. При установке стержней, сборке формы, заливке ее металлом и в период затвердевания отливки в полуформах сохраняется вакуум (рис. 40, ж). В процессе заливки пленка, оформляющая рабочую полость формы, сгорает, а верхняя пленка остается. После охлаждения отливки до заданной температуры вакуум снимается, и отливка свободно удаляется из опок (рис. 40, з). Песок используют многократно. Метод вакуумной формовки имеет следующие преимущества: отпадает необходимость в связующих материалах и выбивных устройствах, увеличивается срок службы моделей, так как наличие пленки устраняет контакт песка с моделью, резко снижается брак по газовым раковинам, повышается геометрическая точность отливок, обеспечивается высокое качество поверхности, улучшаются санитарно-гигиенические условия труда. В настоящее время метод начинают применять в промышленности.

Специальные машины. Примерами таких машин могут служить машины для формовки труб, уплотняющие смесь в опоках механическими трамбовками, или машины, уплотняющие смесь шнеками. Такие машины применяют сравнительно редко.

По методу извлечения модели из формы машины подразделяют на следующие типы:

- со штифтовым подъемом опок;
- с протяжкой модели;
- с поворотной плитой;
- с перекидным столом.

Машины со штифтовым подъемом опок. После уплотнения смеси в опоке 1 четыре штифта 3 проходят через отверстия в модельной плите 2 и, упираясь в углы опоки, поднимают ее над моделью 4, которая вместе со столом 5 машины остается неподвижной (рис. 41, а). Подъем штифтов и их передвижение осуществляется пневматическими цилиндрами. Для предупреждения перекосов опоки и разрушения формы необходимо, чтобы верхние концы штифтов были установлены точно на одном уровне. На практике такие машины применяют только для формовки по простым и невысоким моделям.

Машины с протяжкой модели. При формовке по модели, имеющей близко расположенные друг к другу высокие выступы или ребра, уплотненная смесь между этими ребрами легко обваливается вследствие трения ее о поверхность извлекаемой модели.

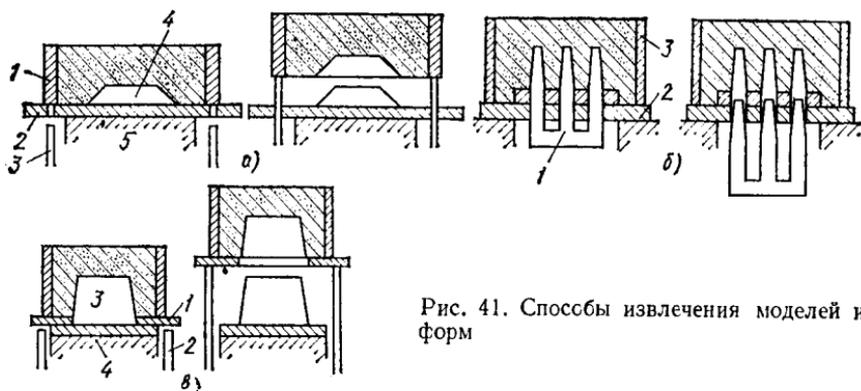


Рис. 41. Способы извлечения моделей из форм

Поэтому для формовки сложных моделей целесообразнее применять машины с протяжкой модели.

Существует два способа протяжки: с проваливающейся моделью и в комбинации со штифтовым подъемом. При первом способе после уплотнения смеси в опоке 3 (рис. 41, б) модель 1 опускается специальным механизмом через прорези в неподвижной модельной плите 2. Затем опоку снимают с машины и отправляют на сборку. Выступающие части формы, расположенные между ребрами, при протяжке модели поддерживаются снизу неподвижной модельной плитой, поэтому они не обваливаются. При втором способе протяжки опоку устанавливают на специальной протяжной плите 1 (рис. 41, в). Плита имеет прорези, соответствующие конфигурации модели 3. После уплотнения смеси в опоке модель, закрепленная на столе 4, остается неподвижной, а протяжная плита 1, поддерживающая кромку смеси около модели, вместе с опокой поднимается штифтами 2. С протяжной плиты опока снимается каким-либо транспортным устройством и отправляется на сборку форм.

Машины с поворотным столом. После уплотнения формовочной смеси в опоке стол 1, на котором закреплена модельная плита 2 с моделью и опока 3, поворачивается на 180° (рис. 42, а). Опока, отсоединенная от модельной плиты на приемном столе 4, опускается, и модель извлекается. Готовая полуформа по транспортному устройству (чаще всего рольгангу) направляется на сборку.

Машины с перекидным столом. Принцип работы машины с перекидным столом (рис. 42, б) аналогичен принципу работы машин с поворотной плитой, а сами машины различаются только конструктивным исполнением.

По типу привода машины подразделяют на ручные, пневматические, гидравлические, механические и электрические.

Машины с ручным приводом малопроизводительны и в настоящее время почти не применяются.

Пневматические машины наиболее распространены. Они просты по конструкции и обслуживанию, работают от сети сжатого воздуха под давлением (5 — 7) 10^5 Па.

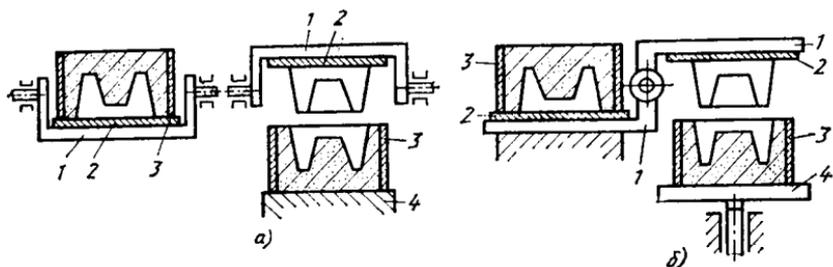


Рис. 42. Машины с поворотной плитой (а) и перекидным столом (б)

Гидравлический привод более компактен, рабочая жидкость находится под давлением $5 \cdot 10^6$ Па — 10^7 Па и обеспечивает необходимую плавность движения рабочих органов машины. Существуют машины с пневмогидравлическим приводом.

Механический привод имеют только пескометы.

Электропривод в настоящее время не получил еще широкого распространения.

Каждый класс машин обладает определенными преимуществами и недостатками, которые в итоге определяют область их применения. Обычно на прессовых формовочных машинах получают удовлетворительные по качеству формы при использовании невысоких (до 250 мм) опок. Кроме того, конструктивные особенности этих машин ограничивают возможность изготовления крупных форм (размером более 1000×1200 мм). Прессовые машины, работающие под высоким давлением, позволяют получать формы в опоках высотой 500 мм с большей степенью уплотнения и использовать смеси с пониженной влажностью, что улучшает качество отливок. Высокая производительность и бесшумная работа обуславливают все более широкое распространение этих машин.

Встряхивающие машины дают возможность изготавливать полужелатинные формы в опоках любых размеров, но для них нерационально использовать опоки высотой меньше 200 мм. Наилучшее уплотнение достигается при встряхивании с последующей подпрессовкой. Встряхивающие машины с прессовыми колодками являются наиболее распространенными формовочными машинами, но в последние годы их вытесняют прессовые машины, работающие под высоким давлением, а также машины других типов. Встряхивающие машины работают с большим шумом.

Пескомет механизмирует заполнение опок и уплотнение смеси, но извлечение модели из формы производят отдельно. Пескомет рациональнее использовать для уплотнения крупных форм в единичном и мелкосерийном производстве.

Пескодующие и пескострельные машины обладают высокой производительностью, дают качественное уплотнение смеси. Особого внимания заслуживают пескострельные машины. По сравнению с пескодующими машинами расход воздуха в них меньше, шире

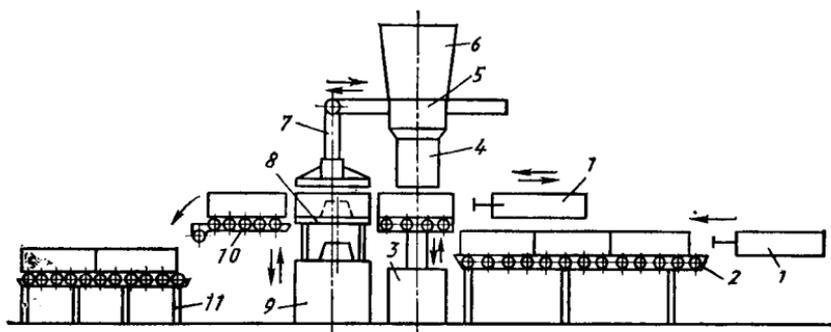


Рис. 43. Автоматическая однопозиционная проходная встряхивающая формовочная машина с протяжной рамой

диапазон применяемых смесей. На пескодувных и на пескострельных машинах можно получать стержни любой сложности.

Широкое развитие получают формовочные импульсные и вакуумные машины. Их использование не только улучшает качество отливок и повышает производительность труда, но и создает более комфортные условия в литейных цехах, поскольку значительно снижается пыле- и газовыделение на всех стадиях технологического процесса изготовления отливок, резко уменьшается уровень шума. Конструкция этих машин позволяет использовать их в автоматических формовочных линиях.

Автоматические формовочные линии. Формовочные и стержневые машины выполняют трудоемкие процессы формовки (уплотнение смеси, извлечение модели), но все-таки многие мелкие операции, снижающие производительность (очистка моделей, установка опок и т. д.), выполняются вручную. В нашей стране и за рубежом созданы высокопроизводительные формовочные линии, в которых механизированы все операции. В состав автоматических и полуавтоматических формовочных линий входят формовочные машины, которые бывают однопозиционными проходными и многопозиционными карусельными. На однопозиционных проходных машинах все операции формовки осуществляются последовательно: обдув модели воздухом, подача смеси в опоку, уплотнение, снятие полуформы с модельной плиты и подача ее на приемное устройство.

Многопозиционные карусельные машины имеют четыре и более позиций, расположенных через равные интервалы на круглом столе. На всех позициях одновременно выполняются различные технологические операции.

На рис. 43 приведена схема работы автоматической однопозиционной проходной встряхивающей формовочной машины с протяжной рамой. С участка выбивки пустые опоки толкателем 1 по рольгангу 2 подаются к машине. Шаг подачи опоки равен размеру опоки по ширине. Подъемный стол 3 в нижнем положении

находится на одном уровне с подающим рольгангом 2 и является как бы отдельной секцией рольганга. Опoka толкателем перемещается на подъемный стол 3. В это время протяжная рама 8 с заформованной опоккой находится на одном уровне со столом 10. С помощью толкателя 1 пустая опока сталкивает полуформу с протяжной рамы и занимает ее место. Одновременно дозатор 5 с воронкой 4 и прессовой траверсой 7 перемещаются до тех пор, пока воронка не расположится над пустой опоккой. Протяжная рама с пустой опоккой опускается на модельную плиту, открывается днище дозатора, и отмеренная порция формовочной смеси через воронку высыпается в опоку. Затем начинается процесс встряхивания. Пустой дозатор с воронкой перемещается вправо под бункер 6, из которого поступает очередная порция смеси.

Вместе с дозатором передвигается и прессовая траверса. Она останавливается под столом машины. К этому моменту встряхивание заканчивается, и прессовый поршень 9 поднимает стол и с ним модельную плиту и опоку. С помощью прессовой траверсы подпрессовываются верхние, слабо уплотненные при встряхивании слои формовочной смеси. Затем прессовый поршень начинает опускаться вместе с модельной плитой и опоккой. Протяжная рама с опоккой останавливается на одном уровне с приемными столами, а модель с плитой, жестко укрепленной на столе, продолжают опускаться, осуществляя тем самым протяжку модели. Готовая полуформа последующей пустой опоккой сталкивается на стол-кантователь 10, который, поворачиваясь на 180°, ставит полуформу разъемом вверх на приемный рольганг 11. Стол-кантователь делают в машинах, предназначенных для изготовления нижних полуформ, так как он выдает их в удобном для сборки форм положении. В машинах для изготовления верхних полуформ стола-кантователя нет, готовая полуформа сталкивается сразу же на приемный рольганг. Готовые полуформы поступают на сборку.

На рис. 44 показана карусельная четырехпозиционная формовочная машина. Ее механизмы расположены неподвижно относи-

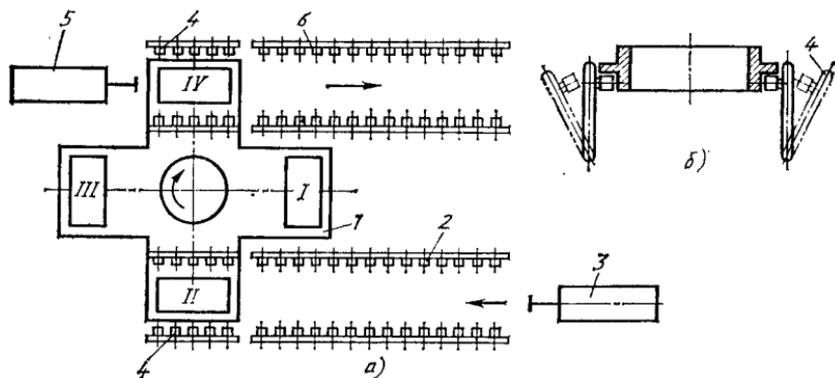


Рис. 44. Карусельная четырехпозиционная формовочная машина

тельно перемещающихся на карусели полуформ. Во время работы карусель 1 периодически поворачивается на 90° (рис. 44, а). На I позиции осуществляется обдув и смазка модели. На II позиции на модельную плиту устанавливается пустая опока, которая подается толкателем 3 по рольгангу 2 на кромочный рольганг 4, а с него на модельную плиту. При этом секции кромочного рольганга расходятся (рис. 44, б). На этой же позиции опока заполняется смесью.

На III позиции смесь уплотняется встряхиванием с подпрессовкой. На IV позиции осуществляется протяжка модели и съем готовой полуформы с помощью толкателя 5 и кромочного рольганга 4. Затем по рольгангу 6 полуформы поступают на сборку. Механизмы всех позиций работают одновременно, что обуславливает высокую производительность машины. В качестве формообразующих агрегатов в автоматических и полуавтоматических линиях могут быть встроены формовочные машины, осуществляющие уплотнение формовочной смеси и другими способами (например, прессованием, импульсом, вакуумом и т. д.).

§ 3. ОСОБЕННОСТИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ СТЕРЖНЕЙ

Стержни изготавливают в специальном отделении литейного цеха, которое называется стержневым. Стержни получают в ящиках, уплотняя смесь вручную либо на машинах, используя в основном пескодувный и пескострельный методы, реже встряхивание.

В зависимости от конфигурации и условий работы стержни делят на пять классов. Наиболее сложными являются стержни первого класса (см. гл. 5), которые можно изготавливать по частям, сушить, а затем склеивать. Размеры и конфигурацию стержней контролируют специальными шаблонами.

Для увеличения прочности стержней в них устанавливают металлические каркасы. Каркас не должен ухудшать податливость стержня, его вентиляцию, а также выбиваемость. С этой целью его укладывают на определенном расстоянии от поверхности стержня (в мелких стержнях на 10—15 мм, в средних на 20—30 мм, в крупных на 60—80 мм). Каркас может быть изготовлен из проволоки или в виде литых рамок. Проволочный каркас используют в средних стержнях, имеющих небольшие сечения (стержни I и II классов), рамки — в крупных массивных (стержни III—V классов).

Стержни, за исключением химически твердеющих, после изготовления сушат. С этой целью их устанавливают на плоскую или фасонную сушильную плиту и подают в сушило. Контроль стержней заключается в проверке размеров шаблонами или другими измерительными инструментами. Кроме размеров, оценивают качество поверхностей — определяют наличие трещин, заусенцев и т. д. Трещины в стержнях и соединительные швы, образующиеся в ме-

стах склеивания, заделывают стержневой смесью или специальной пастой.

Склеивают стержни и исправляют дефекты вручную с помощью специальных приспособлений. Затем их окрашивают ровным слоем толщиной не более 1—1,5 мм (с помощью пульверизатора или окутанием) и после подсушки подают на склад, а оттуда на сборку.

Из всех операций по изготовлению стержней наибольшее время затрачивается на их высушивание. Существенно сократить цикл позволяет применение химически твердеющих смесей, содержащих в качестве связующего жидкое стекло или искусственные смолы. Стержни из жидкостекольной смеси твердеют при продувке углекислым газом за 0,5—5 мин.

Стержни из песчано-смоляных смесей изготавливают в металлических ящиках, нагретых до 250—350 °С. Твердение стержней в оснастке существенно повышает их точность и прочность. Цикл изготовления стержня составляет 0,5—5 мин. Стержневой ящик нагревают электронагревателями, встроенными в его тело, или газовыми горелками. Ящик заполняют стержневой смесью либо свободной засыпкой, либо на пескодувных машинах, которые могут быть как одно-, так и многопозиционными.

В единичном и мелкосерийном производстве отливок, например, при изготовлении изложниц и других деталей металлургического оборудования, формы и стержни получают из жидкоподвижных самотвердеющих смесей. Жидкоподвижная масса, хорошо заполняющая внутреннюю полость стержневого ящика, затвердевает в течение 50—60 мин. Применение этих смесей позволяет использовать деревянные стержневые ящики, исключает операции уплотнения смеси и тепловую сушку стержней, сокращает общую трудоемкость и цикл изготовления.

Аналогичными преимуществами обладает и процесс изготовления стержней из холоднотвердеющих смесей. В состав таких смесей, кроме песка, входят фурановые смолы и отвердитель. Количество отвердителя, в качестве которого часто используют ортофосфорную кислоту, зависит от размеров стержней и времени, в течение которого эта смесь используется. Отвердитель вводят в смесь перед заполнением ею стержневого ящика. Время твердения стержня колеблется от 15 до 300 с. При использовании этих смесей должна быть обеспечена хорошая вентиляция стержневого отделения.

§ 4. СУШКА, ПОДСУШКА И ХИМИЧЕСКОЕ ТВЕРДЕНИЕ ФОРМ И СТЕРЖНЕЙ

Сушка форм и стержней повышает их прочность и уменьшает газотворность. Сначала их медленно нагревают до 100 °С, чтобы избежать растрескивания поверхностей. Далее температуру повышают до заданного значения и выдерживают формы или стержни при этой температуре в течение необходимого для высу-

шивания времени. После этого сухие формы (стержни) медленно охлаждаются до 50—70 °С, предупреждая растрескивание и осыпание поверхностных слоев.

Температура зависит от природы связующего материала, а время выдержки — от конфигурации и толщины стенки формы (стержня). Формы (стержни), приготовленные из смесей с органическими связующими, сушат при температуре 180—240 °С, из песчано-смоляных смесей — при температуре 200—280 °С, из песчано-глинистых смесей — при температуре 300—350 °С. Чем сложнее конфигурация стержня (формы) и толще стенка, тем больший период времени необходим, чтобы вся масса формы или стержня прогрелась до заданной температуры. Время сушки колеблется от нескольких минут до часа. В большинстве случаев формы сушат в камерных печах периодического действия. В таких же печах при единичном и мелкосерийном производстве сушат крупные стержни.

Сушка удлиняет технологический цикл изготовления отливок, поэтому в ряде случаев ее заменяют подсушкой. Высокое качество отливок обеспечивается тогда, когда формы просушиваются на глубину 10—40 мм (от поверхности соприкосновения с металлом). Длительность этой операции составляет 25—30 мин. Подсушенные формы должны быстро заливаться металлом. В противном случае поверхности вновь увлажнятся за счет воды, сохранившейся в глубинных слоях формы. В цехах мелкосерийного производства подсушку осуществляют с помощью переносных сушил, в цехах серийного и крупносерийного производства — в стационарных проходных печах, встраиваемых в конвейерную линию.

При использовании химически твердеющих смесей сушка и подсушка форм не требуется. Например, применение смесей на жидком стекле с последующей продувкой форм или стержней углекислым газом позволяет получать стержень или готовую к заливке форму через 1—15 мин после начала их изготовления.

Получение стержней из песчано-смоляных смесей в подогретых ящиках, а также изготовление стержней из холоднотвердеющих смесей полностью исключает операцию сушки, что позволяет сократить производственные площади, увеличить производительность труда и снизить себестоимость отливок. Такие же результаты достигаются при устранении или сокращении времени сушки форм.

§ 5. СБОРКА ФОРМ

Тщательность сборки в значительной мере определяет точность геометрических размеров отливки, образование заливов и трудоемкость обрубки.

Сборку начинают с установки нижней полуформы на заливочную площадку или тележку конвейера. Затем из полости полуформы сжатым воздухом выдувают сор и пыль, попавшие при из-

Рис. 45. Способы крепления полуформ:

a — скобами; *б* — струбцинами; *в* — болтами; *г* — клиньями; *д* — установкой груза

влечении модели и ремонте полуформы. В чистую полость полуформы в определенной последовательности устанавливают стержни. Устойчивое положение стержней в форме обеспечивается знаками; однако в ряде случаев

используют специальные металлические подставки — *жеребейки*.

Правильность установок стержней проверяют контрольными шаблонами и другими приспособлениями, которые входят в состав модельного комплекта. Одновременно со стержнями, когда это необходимо, устанавливают внутренние холодильники и строго их фиксируют относительно стенок формы и стержней. Затем проверяют все элементы литниковой системы, устанавливают фильтровальные сетки, очищают от загрязнений выпоры. После этого нижнюю полуформу накрывают верхней. Точность совмещения нижней и верхней полуформ обеспечивается стационарными или съемными контрольными штырями.

Для предотвращения подъема верхней полуформы под действием статического давления металла ее скрепляют с нижней полуформой (рис. 45). При заливке форм на конвейерах или рольгангах средние и мелкие формы чаще всего нагружают автоматически.

Для определения массы груза необходимо знать силу действия металла на верхнюю полуформу. Сила, действующая на горизонтальную площадь формы, равна весу столба металла высотой до уровня металла в литниковой чаше или воронке.

Пример. Подсчитать массу груза, необходимого для крепления формы при заливке чугуновой плиты размером $a \times b = 1 \times 0,5$ м.

Если отливка в форме располагается горизонтально (рис. 46, *a*), а стояк заполняется на высоту $h = 0,2$ м, то общее усилие B на верхнюю полуформу составит:

$$B = abhp = 1 \cdot 0,5 \cdot 0,2 \cdot 7000 = 700 \cdot 9,8 = 6860 \text{ Н,}$$

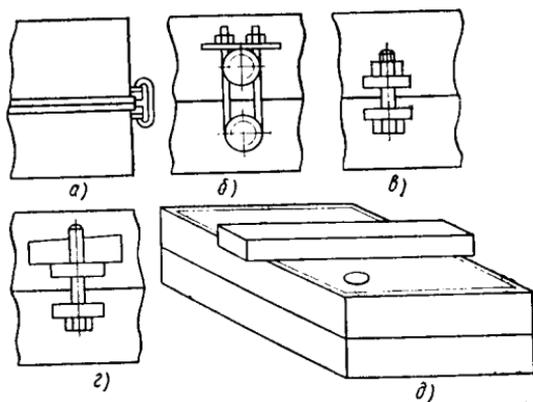
где $\rho = 7000 \text{ кг/м}^3$ — плотность чугуна.

Найденное усилие равно весу воображаемого столба металла. Если в форме есть омываемые металлом стержни (рис. 46, *б*), то общая сила B действия металла на верхнюю полуформу складывается из силы B_{ϕ} действия на внутреннюю поверхность верхней полуформы и силы B_c , выталкивающей стержень плотностью 1600 кг/м^3 :

$$B_{\phi} = 1 (0,5 \cdot 0,5 - 3,14 \cdot 0,5^2 : 4 : 2) 7000 = 1064 \cdot 9,8 = 10418 \text{ Н;}$$

$$B_c = 0,4^2 \cdot 3,14 : 4 \cdot 1 (7000 - 1600) = 678 \cdot 9,8 = 6644 \text{ Н;}$$

$$B = B_{\phi} + B_c = 10418 + 6644 = 17062 \text{ Н.}$$



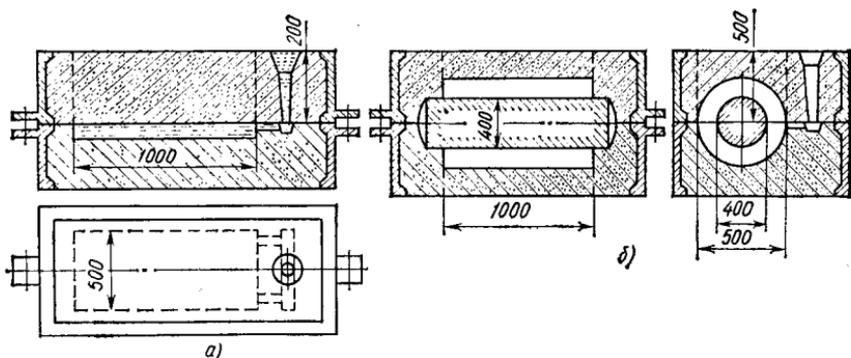


Рис. 46. К определению сил, поднимающих верхнюю опоку

Масса груза

$$M = B/g = 17\,062 : 9,8 = 1\,742 \text{ кг,}$$

где g — ускорение свободного падения, м/с^2 .

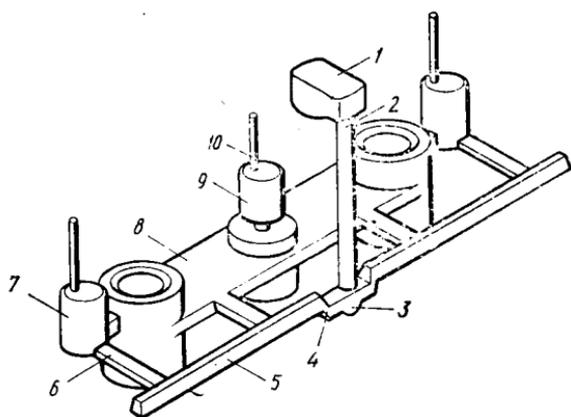
Для определения усилия, которое должно выдерживать крепление опок, из значения B нужно вычесть вес верхней полуформы, а полученный результат увеличить, как показывает опыт, на 30 %, чтобы учесть гидравлический удар металла при заполнении формы.

ГЛАВА 6. ЛИТНИКОВО-ПИТАЮЩИЕ СИСТЕМЫ

Литниково-питающая система — это система каналов и элементов литейной формы, предназначенная для подвода металла к полости формы, ее заполнения и питания отливки во время затвердевания. Первые две задачи выполняются литниковой системой и третья — прибылями, необходимыми для предотвращения образования в отливках усадочных раковин. В некоторых случаях, например при использовании сплавов с малой объемной усадкой или при отсутствии в отливке массивных частей, прибыли можно не предусматривать.

На рис. 47 показана литниково-питающая система. Литниковая воронка или чаша 1 служит для приема металла из заливочного ковша. В чаше происходит частичное отделение от расплава шлаковых включений. Стояк 2, представляющий собой вертикальный канал для передачи металла другим элементам литниковой системы, заканчивается зумпфом 3 или углублением для частичного гашения динамической энергии потока металла. Дроссель 4 является гидравлическим сопротивлением, регулирующим скорость заполнения формы. В нем металл, проходя через суженное сечение, изменяет направление своего течения. Шлакоуловитель 5 предназначен для задерживания шлаковых включений и подвода

Рис. 47. Литниково-питающая система



металла к питателям 6. При разливке из стопорного ковша стали, свободной от шлаковых включений, он выполняет только распределительную роль и называется горизонтальным ходом. Для отливок из цветных сплавов этот канал называется коллектором. Через питатели 6 осуществляется заполнение расплавом рабочей полости формы.

Прибыли, одна из которых 9 верхняя сливная, а две другие 7 боковые проливные, предназначены для питания отливки 8 во время ее затвердевания. Выпор 10 необходим для отвода воздуха и газов во время заливки и служит указателем ее окончания.

Проектирование литниковой системы является важным этапом технологического процесса и оказывает значительное влияние на качество и свойства получаемых отливок. Выбором подвода металла и регулированием его потоков при заполнении формы можно создавать необходимый режим охлаждения отливки и в определенной мере регулировать ее структуру и служебные свойства.

Литниковая система должна отвечать следующим требованиям: заполнять форму металлом за определенное время, обеспечивать минимальное количество неметаллических и газовых включений в металле, создавать рациональный режим затвердевания и охлаждения отливки, иметь небольшую массу, занимать мало места в форме и обеспечивать удобство формовки.

Определение времени заполнения формы является наиболее важной частью расчета литниковой системы, так как оно в наибольшей степени влияет на качество отливок. Продолжительное заполнение вызывает появление в отливках недоливов, неслитин в результате преждевременного охлаждения или затвердевания расплава, а также ужимин и засоров, возникающих в результате длительного теплового воздействия расплава на стенки формы. Ускоренное заполнение связано с появлением в отливках газовых раковин, напряжений, трещин и засоров из-за размыва формы металлом.

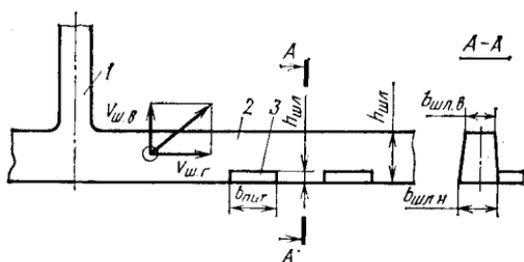


Рис. 48. Схема движения шлаковых включений в прямом шлакоуловителе:

1 — стояк; 2 — шлакоуловитель; 3 — питатель

Удерживание шлаковых включений, вносимых вместе с заливаемым металлом, обеспечивается правильной конструкцией литниковых чаш и шлакоуловителей. В чаше шлак всплывает на поверхность зеркала расплава, а более тяжелый металл уходит в стояк.

На практике наиболее часто применяют прямые шлакоуловители трапециевидного сечения (рис. 48), в которых движение частицы шлака определяется скоростью ее движения в горизонтальном направлении $v_{ш.г}$ совместно с потоком металла и скоростью ее всплытия $v_{ш.в}$, т. е. скоростью в вертикальном направлении. Чем больше отношение $v_{ш.в}/v_{ш.г}$, тем быстрее частица достигнет потолка шлакоуловителя и не будет увлечена в питатель, а затем в полость формы. Увеличение эффективности действия шлакоуловителя достигается обычно снижением $v_{ш.г}$ за счет пропорционального увеличения площади поперечного сечения шлакоуловителя. Дроссели, фильтры, перегородки в шлакоуловителях, являющиеся дополнительными сопротивлениями, также снижают скорость включений в горизонтальном направлении. Повышение температуры чугуна (увеличение $v_{ш.в}$) способствует лучшему шлакозадержанию за счет укрупнения шлаковых частиц и понижения вязкости металла.

Устранение окисления металла и засорения его неметаллическими включениями во время движения по каналам формы гарантируется ламинарными или с допустимой степенью турбулентности потоками металла. Невысокие линейные скорости поступления металла в полость формы устраняют разбрызгивание, нарушение сплошности струи и размывание стенок формы.

С помощью литниковой системы можно регулировать режим затвердевания и охлаждения отливки. Для создания направленного затвердевания от тонких к более массивным частям отливки и далее к прибыли, которая затвердевает последней, питатели необходимо подводить к массивным частям или непосредственно в прибыль. Для обеспечения одновременного затвердевания и снижения напряжения питатели подводят к тонким стенкам отливки.

Направленное затвердевание применяют для сталей, алюминиевых, магниевых и других сплавов, имеющих значительную объемную усадку и склонных к образованию усадочных раковин. Одно-

временное затвердевание целесообразно обеспечивать для сплавов с малой объемной усадкой и не дающих сосредоточенных усадочных раковин (серого чугуна, оловянных бронз и др.).

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Литниковые системы подразделяют по гидродинамическому признаку на сужающиеся и расширяющиеся и по направлению течения расплава в полость формы на верхние, боковые и нижние (сифонные).

Для сужающихся литниковых систем характерно последовательное уменьшение площадей поперечных сечений стояка, шлакоуловителя и питателей:

$$f_{ст} > f_{шл} > \sum f_{пит}.$$

При наличии самого узкого места в питателях, лимитирующих расход металла, обеспечивается быстрое заполнение металлом всей системы и шлакоуловителя в целях лучшего улавливания шлака. Однако истечение металла в полость формы происходит с большой линейной скоростью, что может привести к разбрызгиванию и окислению расплава, захвату воздуха и размыву формы. Наиболее широко эти системы применяют в производстве чугунных отливок.

В расширяющихся литниковых системах узкое место чаще всего находится в нижнем сечении стояка:

$$\bar{f}_{ст} < f_{шл} < \sum f_{пит}.$$

Скорость потока от стояка к питателям последовательно снижается, в результате чего металл поступает в полость формы более спокойно, с меньшим разбрызгиванием, меньше окисляясь и размывая стенки формы. Расширяющиеся системы применяют при изготовлении отливок из стали, алюминиевых, магниевых и других легкоокисляющихся сплавов. В настоящее время наблюдается тенденция их использования и для чугунных отливок.

На рис. 49 показаны литниковые системы с верхним (рис. 49, а), боковым (рис. 49, б—д) и нижним (рис. 49, е) подводом металла.

Для систем на рис. 49, а, б характерным является то, что в течение всей заливки обеспечивается горячее зеркало расплава, что способствует направленному снизу вверх затвердеванию и устранению дефектов отливок, связанных с охлаждением и преждевременным затвердеванием головной части потока металла. Применять их для легкоокисляющихся сплавов нецелесообразно, так как падающая струя способствует образованию оксидных плен и пены.

В системах на рис. 49, б—г шлакоуловители и питатели расположены сбоку отливки в горизонтальной плоскости разъема формы, что удобно в отношении формовки. При машинной фор-

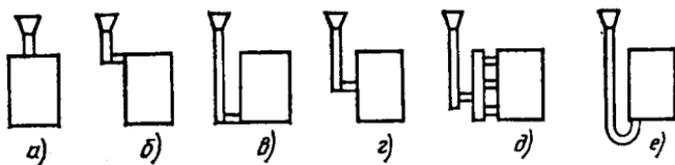


Рис. 49. Литниковые системы с различным подводом металла

мовке наиболее часто используют систему, показанную на рис. 49, г.

В литниковых системах на рис. 49, в, е металл поступает снизу под затопленный уровень без разбрызгивания, окисления и вспенивания, что наиболее важно для легкоокисляющихся пленкообразующих сплавов. Эти системы обычно применяют для отливок с отношением их высоты к толщине стенки не более 50, так как в противном случае форма может не заполниться металлом из-за преждевременного охлаждения и затвердевания головной части потока. Нижний подвод металла не способствует направленному снизу вверх затвердеванию отливки.

Ярусные литниковые системы (рис. 49, д) характеризуются последовательным действием питателей, начиная с нижних, по мере подъема уровня металла в полости формы. Эти системы, обеспечивающие спокойное заполнение и достаточно горячий металл в головной части потока, широко применяют при изготовлении крупных и тонкостенных отливок из черных и цветных сплавов.

§ 2. РАСЧЕТ ЛИТНИКОВЫХ СИСТЕМ

В расчетах используют законы гидравлики, эмпирические зависимости и номограммы. Расчет обычно сводится к определению площади поперечного сечения узкого места $f_{уз}$ литниковой системы с последующим определением площадей поперечных сечений остальных элементов системы.

Основным является уравнение

$$f_{уз} = M / (\rho \tau \mu \sqrt{2gH_p}), \quad (16)$$

где M — масса всех отливок в форме, включая боковые прибыли; ρ — плотность жидкого металла; τ — продолжительность заполнения формы; μ — коэффициент расхода металла; $0 < \mu < 1$; g — ускорение свободного падения; H_p — расчетный статический напор.

Время заполнения формы рассчитывают по формулам, которые можно представить в следующей обобщенной форме:

$$\tau = A \delta^m M^n,$$

где δ — толщина стенки (преобладающая) отливки, мм; M — масса отливки, кг; A , m , n — коэффициенты, значения которых приведены в табл. 9.

Таблица 9

Значения коэффициентов A , m , n
для различных сплавов

Сплав	A	m	n
Чугун *	1,63—2,2	0	0,5
Чугун **	2	0,334	0,334
Сталь **	1,5	0,334	0,334
Алюминиевый **	1,7—3	0,334	0,334
Магниевый **	2,3—4,5	0,334	0,334

* По данным Г. Дитерта.

** По данным Г. М. Дубицкого.

Таблица 10

Коэффициент расхода μ
для различных форм и сплавов

Форма	Чугун	Сталь
Мелкая	0,6/0,5	0,5/0,42
Средняя	0,48/0,42	0,38/0,32
Крупная	0,41/0,35	0,3/0,25

Примечание. В числителе
приведены данные для сухой формы,
в знаменателе — для сырой.

Наиболее часто используют зависимость вида $\tau = A \sqrt[3]{\delta M}$,
в которой $m = n = 0,334$.

Коэффициент расхода μ , характеризующий суммарные гидравлические потери, определять расчетным методом затруднительно, так как литниковые каналы являются относительно короткими и, кроме того, заранее необходимо знать площади сечений и размеры всех элементов литниковой системы. Поэтому его обычно определяют экспериментально. В большинстве случаев $\mu = 0,4 \div 0,7$ (табл. 10).

Наибольшее влияние на коэффициент расхода оказывает сама литниковая система: ее сложность, характер местных сопротивлений, число поворотов и др. Влияние полости формы незначительно, и только для самых сложных и тонкостенных отливок можно вносить поправку 5—7 % в сторону снижения коэффициента μ .

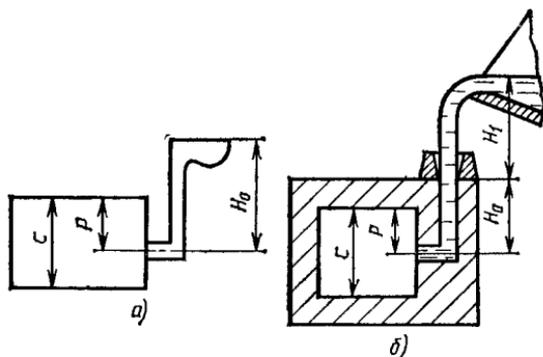
В первом приближении можно пользоваться некоторыми практическими рекомендациями. По мере перехода от нижних к верхним литниковым системам коэффициент расхода увеличивается. Так, например, боковая (см. рис. 49, з) и нижняя (см. рис. 49, в) литниковые системы по сравнению с верхней (см. рис. 49, б) имеют меньшие значения μ соответственно на 0,1 и 0,2. При повышении температуры заливки на 50 °С к значению μ прибавляют 0,05. Если полость формы имеет слабую вентиляцию, то μ уменьшают на 0,05.

При заливке через литниковую чашу происходит полное гашение энергии струи металла, падающей из ковша. Расчетный статический напор в этом случае (рис. 50, а)

$$H_p = H_0 - \rho^2/(2c),$$

где H_0 — начальный напор или расстояние от горизонтальной оси питателей до верхнего уровня металла в чаше; ρ — расстояние от горизонтальной оси питателей до верха отливки; c — высота отливки.

Рис. 50. К определению расчетного статического напора при заливке металла через литниковую чашу (а) и воронку (б)



Для литниковых систем на рис. 49, а, б $p = 0$ и $H_p = H_0$ и для систем на рис. 49, в, е $p = c$ и $H_p = H_0 - c/2$. Если заливка ведется через литниковую воронку (рис. 50, б), то расчетный статический напор

$$H_p = H_0 - p^2/(2c) + H_1,$$

где H_0 — расстояние от оси питателей до верхней кромки верхней опоки; H_1 — расстояние от верхней кромки верхней опоки до уровня металла в поворотном ковше.

После определения площади сечения узкого места по формуле (16) рассчитывают площади поперечных сечений остальных элементов системы. На практике наиболее часто используют следующие соотношения площадей поперечных сечений стояка, шлакоуловителя и питателей:

для чугунов

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} \text{ составляет } 1 : 1,2 : 1,5;$$

$$1 : 1,5 : 1,2; 1 : (1-2) : 1; 1,2 : 1,1 : 1,$$

для сталей

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} = 1,1 : 1,3 : 1,5,$$

а если применяют шамотный сифонный припас

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} = 1 : 1 : (1 - 2),$$

для медных сплавов

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} = 1 : 2 : (2 - 4),$$

для алюминиевых и магниевых сплавов

$$f_{ст} : f_{шл} : \sum f_{пит} = 1 : (2 - 4) : (2 - 6).$$

После расчета площадей сечений определяют размеры всех элементов литниковой системы. Для прямого круглого стояка определяют его диаметр. Наиболее часто используемые трапециевидные шлакоуловители (см. рис. 48) имеют следующие соотношения размеров:

$$b_{шл. в} = 0,8b_{шл. н}; \quad h_{шл} = 1,4b_{шл. н},$$

где $b_{\text{шл. в}}$, $b_{\text{шл. н}}$ — соответственно верхнее и нижнее основания; $h_{\text{шл}}$ — высота шлакоуловителя.

Поперечные сечения питателей обычно имеют прямоугольную форму. Высота питателя $\delta_{\text{пит}}$ не должна превышать толщину отливки в месте подвода металла. Ширину питателя $b_{\text{пит}}$ определяют делением площади его поперечного сечения на высоту. Размеры литниковых чаш и воронок выбирают по справочным материалам.

§ 3. ПРИБЫЛИ

Прибыль — это часть литниково-питающей системы, предназначенная для устранения в отливке усадочной раковины и пористости. В соответствии с принципом направленной кристаллизации при заливке тонкие части отливки выгоднее располагать внизу, а толстые — наверху. На последние сверху устанавливают прибыли. Когда это сделать невозможно, для отдельных термических узлов предусматривают боковые прибыли. Для обеспечения направленности затвердевания можно использовать наружные и внутренние холодильники. Отсутствие возможностей образования усадочных дефектов в отливках проверяют по чертежу методом вписанных окружностей, которые (рис. 51) должны свободно выкатываться из нижних сечений отливки в верхние и далее в прибыль. В отливке, показанной на рис. 51, а, это условие не выполняется ($R_1 > R_2$), поэтому в термическом узле будет образовываться усадочная раковина 1. После нанесения технологического припуска (рис. 51, б), уклона 2 и галтели 3, которые удаляются при механической обработке, вписанные окружности свободно перекатываются ($R_1 \leq R_2$) снизу вверх отливки и далее в прибыль, что обеспечивает направленное затвердевание и, следовательно, отсутствие в отливке усадочных раковин.

Эффективная работа прибыли обеспечивается при соблюдении следующих условий:

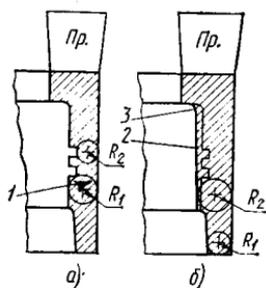
- 1) прибыль должна затвердевать после отливки или питаемого термического узла;
- 2) запас жидкого металла в прибыли должен быть достаточным для питания отливки во время ее затвердевания;
- 3) форма прибыли и ее расположение должны обеспечивать свободный доступ жидкого металла к отливке или питаемому узлу;
- 4) размеры и масса прибыли должны быть минимальными.

Прибыли различаются в зависимости от последовательности поступления в них металла. Проточные прибыли эффективнее сливных (см. рис. 47), так как они в большей мере разогреваются проходящим через них во время заливки металлом.

Открытые прибыли 1 (рис. 52, а) применяют при изготовлении крупных отливок 2. В них можно доливать металл или засыпать экзотермические смеси для его разогрева.

Закрытые цилиндрические прибыли (рис. 52, б) используют при изготовлении отливок 2 на основе методов машинной фор-

Рис. 51. Определение возможности образования усадочных дефектов методом вписанных окружностей



мовки. Выделяющиеся при заливке газы отводятся через тонкие выпоры 3. В верхней части прибыли предусматривают выступ 1 (рис. 52, б) с острым углом или тонкий пористый стержень 4 (рис. 52, в). Когда начинается кристаллизация металла, по стенкам прибыли на хорошо прогретом выступе или стержне корка не образует

разрушается, и через образовавшееся отверстие атмосферное давление воздействует на зеркало жидкого металла в прибыли, повышая эффективность питания отливки. При отсутствии выступа или стержня в усадочной раковине прибыли создается разрежение (давление газов ниже атмосферного) и она работает хуже, так как жидкий металл перетекает в питаемый узел только под действием собственного веса.

При изготовлении крупных ответственных отливок иногда применяют прибыли, работающие под сверхатмосферным давлением. Сжатый воздух под давлением в несколько атмосфер подводится через специальную трубку в прибыль, обеспечивая более эффективное питание отливки.

Отводные цилиндрические прибыли (рис. 52, в) используют для питания термических узлов, расположенных сбоку и снизу отливки. Соединительный канал-перешеек 2 затвердевает позже прибыли 1 и теплового узла 3, обеспечивая нормальное питание последнего. Отводные прибыли характеризуются малыми затратами на обрубные и очистные работы, так как прибыль легко отрезают от отливок по каналу-перешейку.

Облицовочный слой прибылей из теплоизолирующей смеси, в состав которой входят материалы с малой теплопроводностью и теплоемкостью (асбест, вспученный вермикулит, перлит, древесные опилки и др.), дает возможность уменьшить их объем. Еще более эффективны применяемые на практике экзотермические

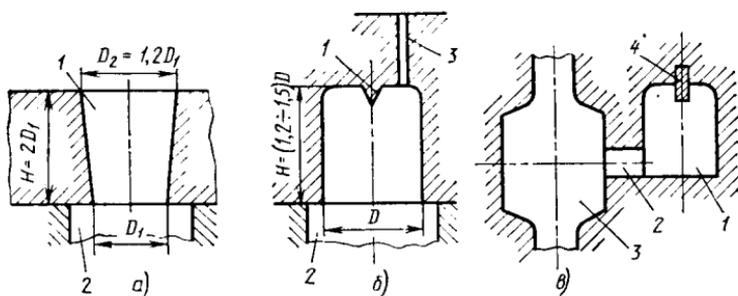


Рис. 52. Прибыли

Коэффициенты K и X для различных прибылей

Прибыль	H/D	K	X
Работающая под давлением: ниже атмосферного (без стержня или вы- ступа)	1	1,15	12
атмосферным со стержнем или выступом)	1,2	1,07	7,5—9
сверхатмосферным	1,3	1,04	5,5—7,5
Открытая	1,1	1,11	9—12
Теплоизолирующая	1,4	1,01	4—5,5
Экзотермическая	1,5	0,985	3—4

прибыли, облицованные специальными смесями алюминиевого порошка, оксидов железа, плавикового шпата, шамота и глины. За счет происходящей экзотермической реакции металл в прибыли длительное время не затвердевает, что обеспечивает хорошее питание отливки. Экзотермические прибыли позволяют значительно сократить расход металла и повысить выход годного литья.

Все перечисленные прибыли в зависимости от конфигурации отливки или теплового узла могут иметь различную форму: шаровую, кольцевую, прямоугольную, овальную и др.

Объем и размеры прибылей рассчитывают на основании теоретических и экспериментальных зависимостей и производственных данных. По одному из известных методов, отличающемся достаточной надежностью и относительной простотой, диаметр цилиндрической прибыли

$$D = K \sqrt[3]{\frac{X_{\epsilon}}{1 - X_{\epsilon}}} v_0,$$

где K — коэффициент, $K = f(H/D)$; H — высота прибыли; X — отношение объема прибыли к объему усадочной раковины; ϵ — коэффициент объемной усадки сплава (в жидком и твердожидком состояниях); v_0 — объем питаемой отливки.

Значения K и X приведены в табл. 11, значений ϵ берутся по справочным материалам.

ГЛАВА 7. ЗАЛИВКА ФОРМ. ОХЛАЖДЕНИЕ, ВЫБИВКА И ОЧИСТКА ОТЛИВОК

§ 1. ЗАЛИВКА ФОРМ

Расплав заливают в предварительно собранные формы. Их обычно устанавливают таким образом, чтобы поверхность разъема была расположена горизонтально, реже вертикально или наклонно. На плацу, в кессонах, на накопительных рольгангах жидкий металл заливают в неподвижные формы. На пульсирую-

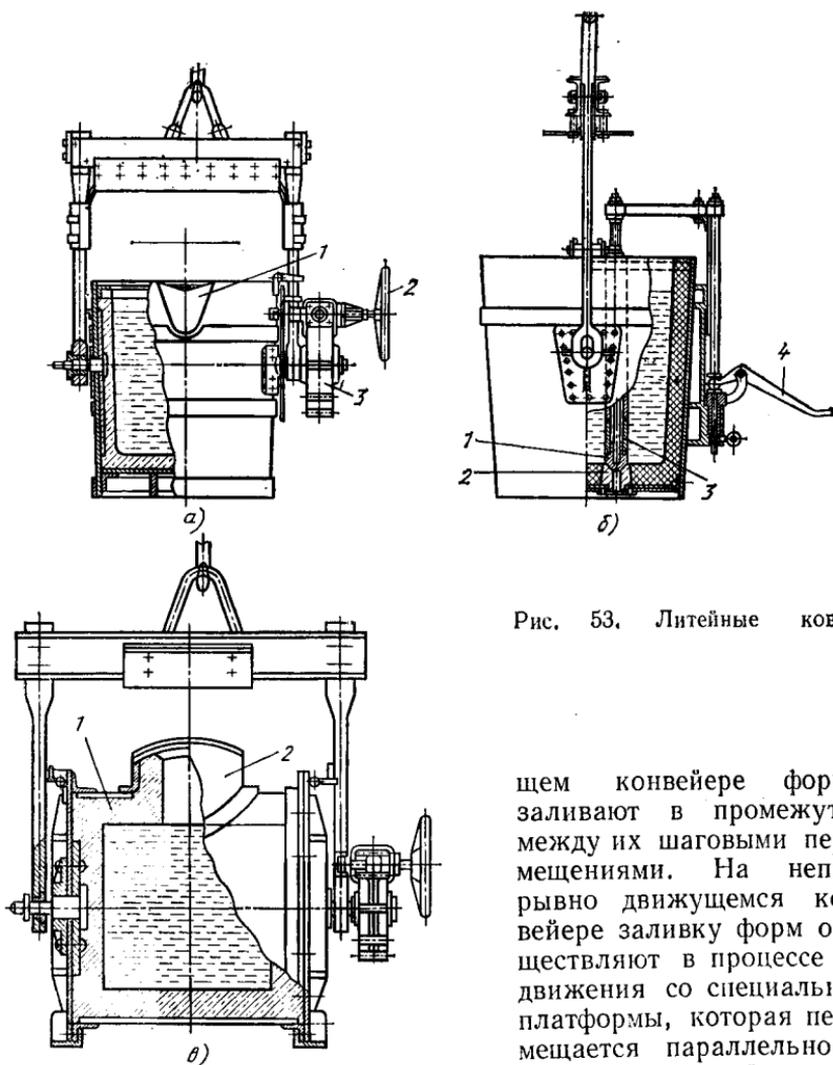


Рис. 53. Литейные ковши

щем конвейере формы заливают в промежутке между их шаговыми перемещениями. На непрерывно движущемся конвейере заливку форм осуществляют в процессе их движения со специальной платформы, которая перемещается параллельно и синхронно конвейеру.

В формы расплав заливают из литейных ковшей или с помощью заливочно-дозировочных устройств.

Литейные ковши — это емкости, металлический кожух которых изнутри футерован огнеупорным материалом. Ковши предназначены для кратковременного хранения и транспортирования жидкого металла, а также для заливки его в литейную форму. В ковшах осуществляют и ряд металлургических операций: рафинирование, модифицирование и легирование.

Литейные ковши классифицируют по способу регулирования расхода металла при разливке, по геометрии рабочей полости и способу транспортирования.

По способу регулирования расхода металла при разливке различают поворотные и стопорные ковши. Из поворотных ковшей (рис. 53, а) расплав разливают в формы через сливной носок 1, расход металла регулируют поворотом ковша вокруг горизонтальной оси. Наклоняют их с помощью ручных рычажных систем или самотормозящих червячных механизмов 3, приводимых в действие от ручного штурвала 2 или электродвигателя. При разливке из поворотных ковшей возможен слив вместе с металлом шлака и попадание его в полость формы. Для избежания этого в ковшах устанавливают перегородки или керамические трубки, обеспечивающие поступление чистого металла из нижних уровней. Такие ковши называют чайниковыми.

Из стопорных ковшей (рис. 53, б) расплав разливают через отверстие огнеупорного стакана 2, размещенного в днище ковша. Отверстие открывают и перекрывают с помощью стопора — стального штока с пробкой 1 на конце, футерованного керамическими трубками 3 и жестко связанного с механизмом его подъема и опускания 4. Ковши вместимостью 1—6 т оборудованы одним стопором, более вместительные — двумя стопорами. При разливке из стопорных ковшей в полость формы всегда поступает расплав, свободный от шлака. Расход металла определяется металлостатическим напором в ковше и площадью поперечного сечения стопорного стакана. Поэтому вначале разливки расход металла всегда больше, чем в конце, что является существенным недостатком стопорных ковшей. Частично расход металла можно регулировать торможением струи стопором. Однако в этом случае быстро размывается пробка стопора, поэтому этот метод регулирования расхода металла применяется ограниченно. Стопорные ковши чаще используют при получении стальных отливок, реже — крупных чугунов.

По геометрии рабочей полости литейные ковши подразделяют на конические и барабанные. Конические ковши имеют форму усеченного конуса, уширенного кверху, и могут быть поворотными (рис. 53, а) и стопорными (рис. 53, б). Барабанный ковш является поворотным и представляет собой горизонтальный цилиндр 1, диаметр рабочей полости которого равен длине (рис. 53, в). Он имеет небольшую горловину 2 для заполнения расплавом и разливки. Поэтому в нем расплав остывает медленнее. Относительно малая высота ковшей обеспечивает удобство заливки форм. Но их труднее футеровать. Наиболее широко барабанные ковши применяют для разливки чугуна, значительно реже — для разливки стали и бронзы.

По способу транспортирования различают ручные, монорельсовые и крановые ковши. Вместимость ручных ковшей составляет 6—60 кг, монорельсовых — 100—800 кг, крановых 1—70 т. Ручные ковши являются поворотными коническими. Их применяют при производстве мелких отливок (при металлоемкости формы до 30 кг) в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Из монорельсовых ковшей, которые могут быть поворотными коническими и барабанными, заливают формы на конвейерах при производстве мелких и средних отливок.

Крановые ковши (конические и барабанные, поворотные и стопорные) применяют в единичном и серийном производстве отливок из чугуна, стали и сплавов цветных металлов.

При производстве мелкого литья на конвейере расплав из печи предварительно выпускают в раздаточный ковш большой вместимости, который устанавливают на специальном стенде заливочного участка. Из раздаточного ковша жидкий металл переливают в разливочный ковш малой вместимости.

Основным фактором, определяющим размеры ковшей, является металлоемкость форм. Так, для разливки чугуна рекомендуют применять ковши вместимостью, в 2—10 раз превышающей металлоемкость формы. При производстве мелкого стального литья применяют конические ковши с перегородками (чайниковые) вместимостью до 800 кг. Вместимость стопорных сталеразливочных ковшей наряду с металлоемкостью форм регламентируется допустимой кратностью открытия и закрытия отверстия стопорного стакана. Она обычно составляет 30—50 и лишь в отдельных случаях 70—120. При заливке из двустопорных ковшей десяти и более форм второе стопорное устройство используют как резервное. Меньшее число форм можно заливать одновременно через оба отверстия стопорного стакана. В сталелитейных цехах при заливке форм металлоемкостью более 90 т рекомендуют одновременно использовать несколько ковшей меньшей вместимости.

Ручные и монорельсовые ковши вместимостью до 500 кг футеруют огнеупорным составом из 75 % кварцевого песка и 25 % огнеупорной глины. Кварцевый песок на 2/3 может быть заменен шамотным порошком. Крановые конические и барабанные ковши, а также монорельсовые ковши для разливки чугуна вместимостью более 500 кг футеруют шамотным кирпичом. Кладку футеровки проводят с использованием увлажненной огнеупорной массы из наполнителя, идентичного или близкого по природе футеровочному кирпичу, и огнеупорной глины. При футеровке носка вместо огнеупорной глины применяют жидкое стекло. Футеровку стенок рекомендуется выполнять толщиной 0,14 R, а днища — толщиной 0,2 R, где R — внутренний радиус ковша у верхней кромки.

После футеровки ковши сушат, а перед наполнением расплавом разогревают до 700—1000 °С для полного удаления свободной и связанной влаги, а также снижения потерь теплоты заливаемого сплава. Недостаточно просушенная футеровка может быть причиной насыщения металла водородом. Ручные и монорельсовые ковши сушат при 300—350 °С в течение 3—8 ч. Крановые ковши большой вместимости сушат в две стадии: сначала в течение 8—10 ч просушивают арматурный слой футеровки, прогревая его до 700—900 °С; после остывания арматурного слоя выкладывают рабочий слой и сушат его в течение 10—15 ч, постепенно прогревая до 900 °С.

Автоматические заливочно-дозировующие устройства одновременно выполняют операции дозирования и заливки. По принципу действия их подразделяют на электромеханические, пневматические, электромагнитные и комбинированные. В электромеханических устройствах для дозирования и выдачи металла используют наклоняющиеся ковши секторного (рис. 54, а), барабанного или

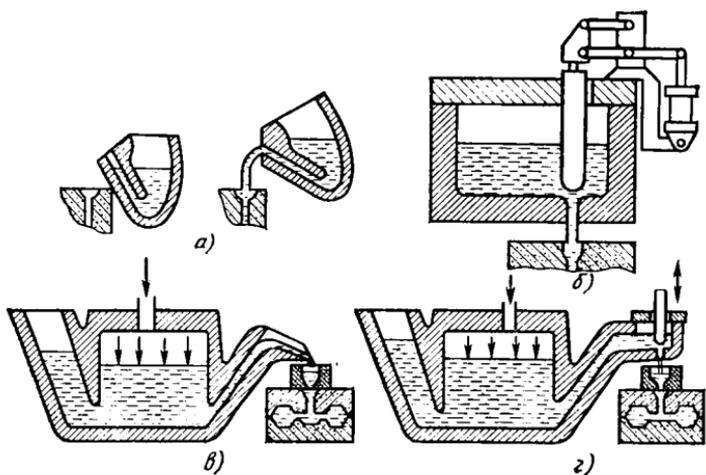


Рис. 54. Заливочно-дозировочные устройства

чайникового типа, а также ковши со стопорной (рис. 54, б) и шибровой выдачей металла. Дозирование порции металла осуществляют по времени его выдачи или по массе, а в наклоняющихся ковшах и по объему.

В пневматических подающих устройствах дозу расплава вытесняют из емкости сжатым воздухом или инертным газом (рис. 54, в). Расход металла регулируют изменением давления газа, а требуемую порцию дозируют по времени или по массе. В комбинированном пневмостопорном устройстве (рис. 54, г) используется принцип вытеснения расплава газом и стопорной выдачи металла.

В электромагнитных подающих устройствах слив металла осуществляют с помощью бегущего электромагнитного поля или магнитодинамического насоса МДН (рис. 55).

Установка с МДН состоит из тигля 3 с крышкой 2. Тигель сообщен со сливным каналом через два боковых вертикальных и горизонтальный канала. Боковые каналы 7 и 9 охвачены индукторами 4 и 8 с обмотками 6. Участок соединения трех каналов расположен в межполюсном зазоре электромагнита 10 с обмотками 11. При включении обмоток индукторов в сеть по металлу идет ток, который,

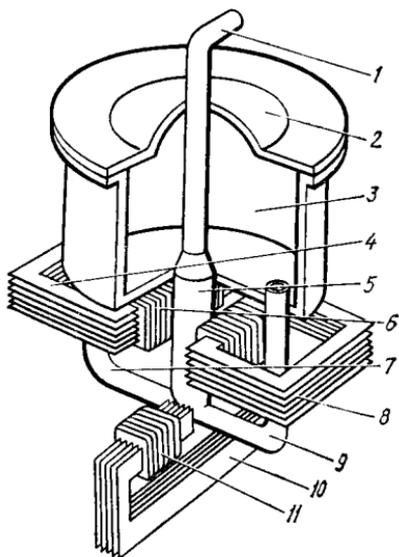


Рис. 55. Установка с магнитодинамическим насосом

взаимодействуя с внешним магнитным полем, создает электромагнитные силы, оказывающие силовое воздействие на расплав. При включении индукторов в режим насоса, а электромагнита — в режим нагнетания электромагнитные силы выталкивают расплав по каналу 5 в металлопровод 1, и он выливается в форму. Раздельное управление электромагнитными системами позволяет регулировать как скорость заливки, так и температуру металла. Дозирование осуществляют по времени разлики, объему или массе.

Преимуществом МДН является малая инерционность, отсутствие необходимости герметизации ванны с металлом, возможность снижения насыщенности металла газами и содержания в нем оксидных включений, дополнительного нагрева металла и полной автоматизации процесса заливки.

В формы металл заливают короткой струей, не допуская ее разрыва и разбрызгивания. Начальную порцию расплава из ковша или заливочного устройства в форму сливают слабой струей, затем мощность струи увеличивают с целью быстрого заполнения литниковой чаши или воронки. В дальнейшем расход металла выбирают таким, чтобы он был достаточным для поддержания уровня металла в чаше. При этом режим заполнения полости формы расплавом регулируется статическим напором заливаемого металла и соответствующими размерами элементов литниковой системы. Заливку прекращают при появлении расплава в выпоре или после заполнения прибыли.

При автоматической разливке металла на литейных конвейерах продолжительность цикла дозирования и заливки задана производительностью формовочных автоматов. Если она меньше оптимальной продолжительности заполнения одной формы, то дозированную порцию металла сливают в металлоприемные емкости. На автоматических литейных линиях с непрерывным движением конвейера роль такой емкости выполняют металлоприемные желоба, а на пульсирующих конвейерах — накопительные чаши. Режим заполнения форм из них определяется уровнем расплава в приемной емкости и литниковой системой. Применение промежуточных металлоприемников позволяет обеспечить требуемый режим заполнения формы при высокой производительности литейных автоматических линий. Однако металлоприемники имеют большую поверхность охлаждения расплава, поэтому для компенсации потерь теплоты в них необходимо повышать температуру жидкого металла.

Температуру заливки конкретного литейного сплава определяют по его перегреву относительно температуры ликвидуса. Выбор перегрева зависит от его влияния на структуру и механические свойства сплава, толщины (минимальной, преобладающей) и протяженности стенок отливки, склонности сплава к пленообразованию, теплофизических свойств материала формы и ее начальной температуры, движущей силы, определяющей перемещение сплава в полости литейной формы, и других факторов. Для обеспечения удовлетворительного заполнения форм при изготовлении отливок из углеродистых и низколегированных сталей

обычно достаточно перегреть расплав на 30—60 °С. При изготовлении тонкостенных стальных отливок перегрев увеличивают до 100 °С. Еще больший перегрев назначают при разливке высоколегированных сталей, склонных к пленообразованию. Абсолютные значения температур заливки сталей обычно колеблются от 1520 до 1620 °С.

Чугуны возможно и целесообразно заливать в формы при перегревах, составляющих сотни градусов. В зависимости от толщины стенки отливки серый чугун разливают при 1300—1450 °С. Температура разливки ковкого и высокопрочного чугунов при тех же толщинах отливки выше соответственно на 30—60 и 50—70 °С.

Бронзы, алюминиевые и магниевые сплавы из-за пленообразования перегревают на 100—200 °С. Температура разливки латуней и бронз составляет 1000—1200 °С, алюминиевых и магниевых сплавов соответственно 680—770 и 700—800 °С.

§ 2. ОХЛАЖДЕНИЕ ОТЛИВОК И ВЫБИВКА ИХ ИЗ ФОРМ

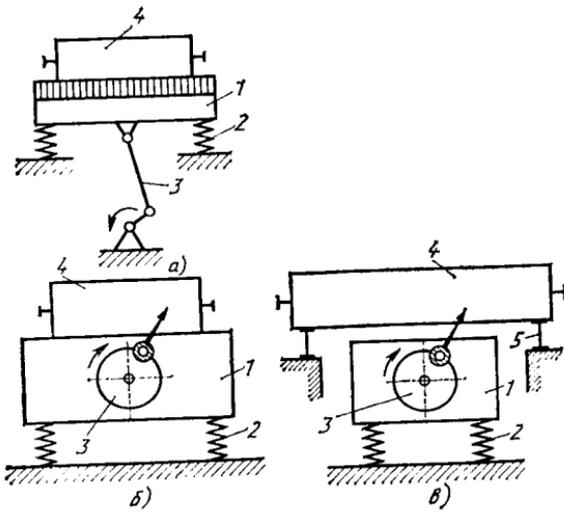
Охлаждение отливок в форме. После затвердевания отливку выдерживают в форме для охлаждения до температуры выбивки.

Чем выше температура выбивки, тем короче технологический цикл изготовления отливки и больше производительность формовочно-заливочного участка. Однако высокая температура выбивки нежелательна из-за опасности разрушения отливки, образования дефектов или ухудшения ее качества. Вблизи температуры кристаллизации сплавы имеют низкие прочностные и пластические свойства, поэтому опасность разрушения отливок особенно велика. Кроме того, на воздухе отливки остывают быстрее, чем в форме. При этом неравномерность охлаждения массивных и тонких сечений усиливается, и уровень внутренних напряжений в отливке возрастает. Ранняя выбивка может привести к образованию трещин, короблению и сохранению в отливке высоких остаточных напряжений.

Длительная выдержка в форме с целью охлаждения до низкой температуры нецелесообразна с экономической точки зрения, так как удлиняет технологический цикл изготовления отливки. Поэтому выбивку стремятся производить при максимально высокой допустимой температуре. Она зависит от природы сплава, а также от конструкции (сложности) отливки. Стальные отливки рекомендуют охлаждать в форме до 500—700 °С, чугунные до 400—500 °С. Сложные отливки, склонные к образованию трещин, охлаждают в форме до 200—300 °С, а отливки, не склонные к образованию трещин, до 800—900 °С. Температура выбивки отливок из бронз составляет 300—500 °С, из алюминиевых и магниевых сплавов соответственно 200—300 и 100—150 °С.

Продолжительность выдержки в форме определяется толщиной стенки отливки, свойствами залитого сплава и литейной формы,

Рис. 56. Выбивные решетки



температурой выбивки. Она может быть рассчитана (см. гл. 2) или определена экспериментально. В зависимости от природы сплава и конструкции отливки время выдержки в песчаной форме составляет от нескольких минут до суток и даже недель.

Для сокращения продолжительности охлаждения отливок иногда используют методы принудительного охлаждения. Например, формы, залитые на конвейере, охлаждают обдувкой их воздухом в охлаждающих галереях. Остывание крупных отливок интенсифицируют установкой в форму змеевиков или труб, по которым пропускают воздух или воду. В некоторых случаях воздух (газ) пропускают через зазор между отливкой и формой.

Средняя скорость охлаждения отливок в формах колеблется от 2 до 150 °С/мин. Скорость охлаждения выбирают с учетом толщины стенок отливки и прочностных свойств сплава. При большой разнице скоростей охлаждения отдельных частей отливок возникают большие термические напряжения, которые могут привести к короблению отливок или появлению в них трещин. При принудительном охлаждении отливок возможно не только сокращение продолжительности выдержки их в форме, но также выравнивание скоростей охлаждения тонких и массивных узлов и снижение термических напряжений.

Во многих случаях применяют высокотемпературную выбивку с последующим более медленным, чем на воздухе, охлаждением отливок, например, в колодцах, коробах, вместе с комом смеси и т. д.

Выбивка форм. Обычно эту операцию выполняют на механических выбивных решетках (рис. 56), которые по принципу действия классифицируют на эксцентриковые (рис. 56, а), инерционные (рис. 56, б) и инерционно-ударные (рис. 56, в). Решетка 1

с литейной формой 4 с помощью привода 3 и опорной пружины 2 совершает колебательное движение. В каждом цикле колебаний решетки форма подбрасывается вверх и затем, падая, ударяется о решетку или опорную раму 5. В момент соударения под действием сил инерции форма разрушается. Выбитая из опоки формовочная смесь проваливается через решетку и системой конвейеров передается к месту ее переработки для повторного использования.

На поточных и автоматических линиях отливки выдавливают из опоки с комом смеси, а затем освобождают от смеси на выбивных решетках. Ответственные отливки извлекают из формы перед ее выбивкой. Выбивка форм сопровождается выделением большого количества теплоты и пыли, поэтому участки выбивки форм оснащают мощными системами вытяжной вентиляции, а выбивные решетки большой грузоподъемности (выше 10 т) имеют пыле- и звукоизолирующие накатные кожухи.

Выбивка стержней из отливок. Остатки стержней после выбивки из форм удаляют из отливок пневматическими зубилами, на вибрационных машинах, в гидравлических камерах и электрогидравлических установках.

Стационарные пневматические вибрационные машины (рис. 57) используют для выбивки стержней из отливок небольших размеров и массы. Отливка 2 со стержнем с помощью толкателя 5 зажимается между пружинным упором 1 и бойком вибратора 3. Затем включают вибратор 4.

Под действием вибрации стержень разрушается и выбивается из отливки. Процесс сопровождается сильным выделением пыли и шумом. Поэтому пневмовибрационные установки выпускают в закрытом (пыле- и звукоизолирующем) исполнении.

В гидравлических камерах и электрогидравлических установках выбивают стержни из крупных стальных и чугуновых отливок. В гидрокамерах отливку устанавливают на поворотный стол и на нее

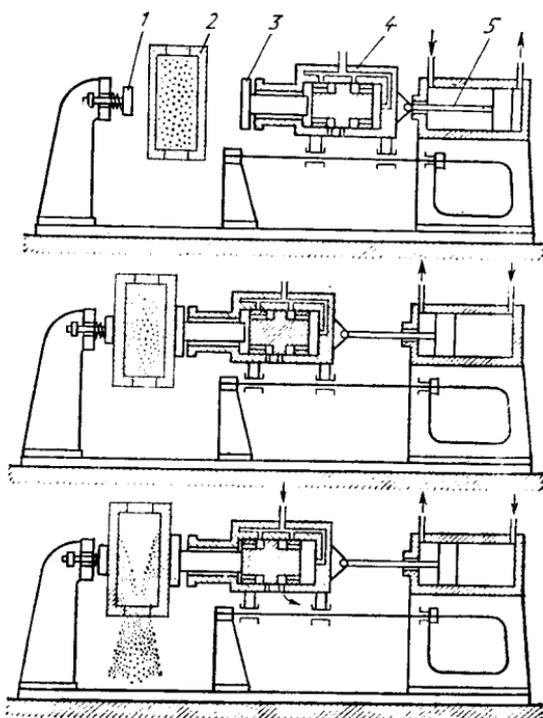


Рис. 57. Схема работы пневматической вибрационной машины для выбивки стержней

направляют струю воды (диаметром 5—20 мм) под давлением 5—10 МПа. Одновременно с удалением стержня происходит очистка поверхности отливки. В электрогидравлических установках стержни разрушаются ударной волной, возникающей при высоковольтном электрическом разряде между двумя электродами в воде. При прямом методе одним из электродов является отливка.

После выбивки стержней из отливок удаляют каркасы. Затем отливки подвергают предварительному контролю для выявления в них видимых неисправимых дефектов (не полностью заполненные металлом стенки, явное нарушение геометрии, вызванное перекосом стержней или сдвигом одной опоки относительно другой, и пр.).

§ 3. ОБРУБКА, ОЧИСТКА И ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ОТЛИВОК

После выбивки из форм отливки обычно обрубают и очищают.

Обрубка отливки заключается в отделении от нее прибылей, литников, выпоров и в удалении заливов по месту сопряжения полуформ или в области стержневых знаков. Обрубают отливки с помощью молотков и пневматических зубил, абразивных кругов и прессов, ленточных и дисковых пил, также используют дуговую, газовую или анодно-механическую резку. В некоторых случаях прибыли отрезают на токарных станках.

Пригар на поверхностях отливок существенно затрудняет резку литников и прибылей. В таких случаях перед обрубкой отливки вместе с литниками и прибылями очищают.

Литники от чугуновых отливок легко отбиваются при слабом ударе. От мелких отливок они отделяются в основном при выбивке форм. Оставшиеся на отливках литники отбивают молотками или обламывают на прессах. В отдельных случаях отделение литников от чугуновых отливок совмещают с предварительной очисткой в галтовочных барабанах. Литники от мелких стальных отливок также отбивают молотками. Прибыли и литники от крупных отливок из углеродистых и низколегированных сталей отделяют дуговой и газовой резкой. При производстве отливок из некоторых высоколегированных сталей для этой цели применяют механическую или анодно-механическую резку. Ленточные и дисковые пилы, механические прессы широко применяют для отрезки литников и прибылей от отливок из алюминиевых, магниевых и медных сплавов.

Очистка отливок. Для удаления пригара и улучшения поверхностей отливок подвергают очистке галтовкой, дробеструйной, дробеметной, вибрационной и электрохимической обработке.

Очистку отливок галтовкой осуществляют в барабанах периодического и непрерывного действия. Барабаны периодического действия применяют в цехах мелкосерийного производства, в массовом производстве используют барабаны непрерывного действия. Очистка отливок в барабанах происходит в результате их взаим-

ного трения. Для усиления эффекта трения в барабан вместе с отливками загружают звездочки из отбеленного чугуна. При вращении барабана отливки перекатываются, трутся друг о друга и о звездочки, в результате чего удаляется приставшая к поверхности отливки формовочная смесь.

Галтовочные барабаны непрерывного действия (рис. 58) имеют два кожуха. Отливки по лотку 5 и звездочки с помощью лопаток 4 непрерывно поступают во внутренний кожух 1. Перемещаясь к другому концу барабана, отливки очищаются. Звездочки, не доходя до конца барабана, проваливаются во внешний кожух 2 и спиральными направляющими 3 вновь подаются к загрузочному окну. Отработанная смесь проваливается через отверстия во внешнем кожухе и удаляется из барабана.

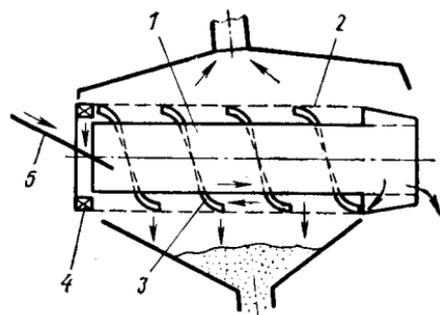


Рис. 58. Галтовочный барабан непрерывного действия для очистки отливок

Для очистки отливок широко используют дробеструйные аппараты. Из таких аппаратов на поверхности отливок под давлением воздуха или воды подается чугунная дробь. Она обладает большой кинетической энергией и очищает поверхность отливок тем быстрее, чем мощнее струя. Дробеструйную очистку проводят в барабанах, на поворотных столах, в специальных камерах. Выбор того или иного оборудования зависит от номенклатуры отливок и их сложности. Дробеструйной очистке нельзя подвергать отливки из мягких сплавов, так как это ухудшает качество их поверхностей. Для очистки отливок из алюминиевых сплавов вместо чугунной дроби используют кусочки алюминиевой проволоки.

Чугунные и стальные отливки обычно подвергают дробеметной очистке. На очищаемую поверхность дробь подается метательными головками 1 в виде турбинок, вращающихся с частотой до 3000 об/мин. Дробь, выбрасываемая большой центробежной силой, ударяется о поверхность отливок 2 и очищает ее (рис. 59). Дробеметная очистка более производительна, чем дробеструйная. Она осуществляется в дробеметных очистных барабанах и камерах. В дробеметных барабанах очищают мелкие и средние отливки массой до 40 кг. Равномерная очистка всех поверхностей отливок достигается в процессе их перекатывания внутри вращающегося барабана 3 (рис. 59, а) или на движущемся пластинчатом конвейере 3 (рис. 59, б) внутри неподвижного барабана. В массовом производстве применяют очистные барабаны с пластинчатым конвейером непрерывного действия, в которых отливки в процессе очистки перемещаются еще вдоль оси барабана.

В дробеметных камерах очищают отливки массой более 50 кг. Отливки устанавливают на вращающиеся очистные столы или

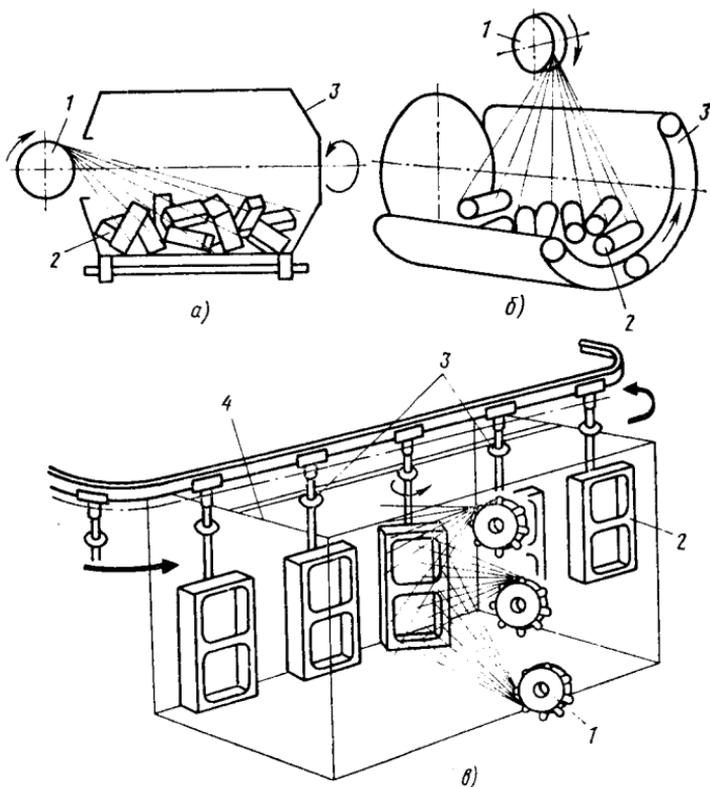


Рис. 59. Схемы дробеметной очистки отливок

подвешивают на вращающиеся подвески 3 (рис. 59, в). Очистка происходит внутри камеры 4. В массовом производстве применяют проходные дробеметные камеры непрерывного действия, а при небольшом объеме производства отливок — тупиковые дробеметные камеры периодического действия.

Остатки смеси и пригар на внутренних поверхностях чугунных и стальных отливок, труднодоступных при дробеметной очистке, успешно удаляют электрохимической обработкой. Для этого отливки погружают в расплав NaOH или KOH, температура которого 450—500 °С, и подключают к источнику постоянного тока напряжением 2,5—3,5 В и плотностью 0,03—0,05 А/м². Отливки в течение 7—8 мин являются катодом, в течение 3—4 мин анодом и 3—4 мин вновь катодом. После этого их промывают в холодной и горячей воде. Очистка поверхности отливок происходит за счет катодного восстановления оксидов железа и растворения SiO₂, пригара и смеси в щелочном расплаве с образованием силикатов.

Мелкие отливки весьма эффективно очищаются вибрационным способом. Для этого отливки и абразивный наполнитель загружают в контейнер, установленный на упругой подвеске, и при-

водят в колебательное движение с частотой до 3000 в минуту с амплитудой 3—5 мм. В процессе взаимного перемещения частицы наполнителя обрабатывают металлическую поверхность.

В современных крупных литейных цехах используют комплексные установки для очистки отливок. Например, поточная линия очистки включает выбивную решетку, галтовочный барабан, дробеметные установки, зачистные станки и систему конвейеров для передачи отливок с одной операции на другую.

Зачистку отливок проводят с целью удаления мелких заливок, остатков прибылей и литников, а также других неровностей и выступов на поверхности отливки. Эту операцию выполняют с помощью абразивных кругов, установленных на различных станках. Отливки массой до 10 кг зачищают на стационарных шлифовальных станках. Для очистки отливок большей массы применяют подвесные, маятниковые или переносные станки. В массовом производстве мелких и средних отливок нашли применение полуавтоматические и автоматические станки и линии, обеспечивающие повышение производительности обработки в 5—10 раз. Отливки из вязких сплавов — сталей, ковкого чугуна, бронзы и алюминиевых сплавов — зачищают корундовыми шлифовальными кругами, а отливки из хрупких сплавов, например серого чугуна, — карборундовыми.

Отливки из легкоплавких сплавов очищают также электроконтактным способом. По этому способу отливку и вращающийся стальной диск подключают к источнику тока. При контакте диска с выступом на поверхности отливки цепь замыкается, заусенцы и заливки оплавляются и в виде мелких частичек отбрасываются диском от зачищаемой поверхности.

Стальные отливки зачищают также газокислородными горелками, которые применяют для обрезки литников и прибылей.

Термическая обработка отливок. Отливки в литом состоянии имеют крупнозернистую структуру, высокую твердость, низкие прочностные и пластические свойства. В них сохраняются значительные внутренние напряжения. Структура и свойства отливок могут быть значительно улучшены термической обработкой. Вид обработки (отжиг, нормализация, закалка, отпуск) определяется природой сплава, конфигурацией отливки и техническими условиями.

Стальные отливки обычно подвергают термической обработке в два этапа. Сначала проводят предварительную термообработку (отжиг, нормализацию или нормализацию с отпуском) для снятия внутренних напряжений, измельчения структуры и уменьшения твердости перед механической обработкой. При отжиге эти задачи решаются полнее, однако недостатком этого вида обработки является большая продолжительность. Поэтому отжигают лишь отливки, склонные к образованию значительных внутренних напряжений. Отливки простой конфигурации подвергают нормализации. Для отливок ответственного назначения назначают нормализацию и отпуск. При окончательной термической обработке стальные отливки подвергают нормализации и отпуску или закалке и отпуску. Выбор закалочной среды (вода или масло) зависит от состава стали (ее закаливаемости) и сложности отливки, а температура отпуска (низкий, средний или высо-

кий) — от требуемых механических свойств отливки. По мере повышения температуры отпуск прочность и твердость снижаются, а пластические свойства и ударная вязкость повышаются. Если нагрев и охлаждение отливок происходят в окислительной среде, то поверхность покрывается окалиной. Поэтому отливки подвергают повторной очистке. Механически обработанные стальные отливки при необходимости подвергают цементации, азотированию и другим видам химико-термической обработки.

Чугунные отливки подвергаются термической обработке значительно реже. Ее применяют для снятия внутренних напряжений, стабилизации размеров, снижения твердости и улучшения обрабатываемости, повышения механических свойств или износостойкости. При низкотемпературном отжиге (500—630 °С) снимаются внутренние напряжения и стабилизируются размеры отливки, а механические свойства практически не изменяются. При низкотемпературном графитизирующем отжиге (680—750 °С) происходит графитизация и частичная сфероидизация эвтектоидного цементита. Вследствие этого снижаются прочность и твердость, но улучшается обрабатываемость. Высокотемпературный графитизирующий отжиг (850—980 °С) применяют для графитизации первичных карбидов в чугунах всех видов. При получении ковкого чугуна из белого этот вид термообработки является обязательным.

При нормализации и закалке чугунных отливок улучшаются механические свойства. При нагреве до 850—950 °С часть графита растворяется в аустените. При последующем охлаждении на воздухе или в закалочной среде углерод не успевает вновь полностью выделиться в виде графита, поэтому количество связанного в цементит углерода возрастает, и прочность, твердость, а также износостойкость отливки увеличиваются. При нормализации чугуна образуется перлитная металлическая матрица, а при закалке — мартенситная. Соответственно во втором случае достигается больший прирост твердости, прочности и износостойкости. Закаленные отливки требуют дополнительной термической обработки для снятия внутренних напряжений.

Чугунные отливки при необходимости придания им особых свойств подвергают химико-термической обработке: азотированию, алитированию, сульфидированию, борированию и т. п.

Качество отливок из алюминиевых и магниевых сплавов улучшают путем старения, отжига, закалки и закалки с последующим искусственным старением. Отливки из медных сплавов обычно не подвергают термической обработке. Лишь в отдельных случаях их отжигают для снятия внутренних напряжений.

§ 4. ДЕФЕКТЫ ОТЛИВОК И ИХ ИСПРАВЛЕНИЕ

Отливки, прошедшие промежуточный контроль на различных стадиях технологического процесса, подвергают окончательному контролю для определения их соответствия требованиям стандартов и технических условий. Проверяют химический состав сплава, структуру, геометрию и размеры отливок, механические свойства, устанавливают отсутствие поверхностных и внутренних дефектов. В зависимости от назначения и ответственности отливок производят сплошной или выборочный контроль.

Соответствие по геометрии устанавливают путем разметки отливок на специальных разметочных столах (плитах) с помощью различных измерительных инструментов и приспособлений. Так выявляют коробление, перекося, подутость и разностенность. Систематический контроль размеров отливок позволяет своевременно предупредить брак из-за износа или коробления моделей и стержневых ящиков. Точность отливок по массе устанавливают взвешиванием.

Механические свойства (временное сопротивление, твердость, относительное удлинение, ударную вязкость и др.) определяют испытаниями отдельно изготовленных или прилитых образцов. В некоторых случаях образцы вырезают из тела отливки. Число отливок, отбираемых для испытания, регламентируется техническими условиями на поставку. Герметичность отливок, которые по условиям работы должны выдерживать повышенное давление газа или жидкости, контролируют путем проведения гидро- или пневмоиспытаний при давлениях, несколько превышающих рабоче.

Внутренние дефекты отливок выявляют методами радиографической и ультразвуковой дефектоскопии. В радиографической дефектоскопии (рентгеноскопии, гамма-дефектоскопии) получают негативный снимок отливки при облучении рентгеновскими или гамма-лучами. Дефекты отливок (шлаковые включения, газовые и усадочные раковины, рыхлота, поры, трещины) в меньшей степени поглощают (ослабляют) интенсивность лучей, чем сам металл, поэтому на пленке такие дефекты появляются в виде темных пятен. Радиографические методы позволяют определить глубину залегания дефекта и его размеры.

При ультразвуковом контроле используется способность ультразвуковой волны отражаться от границы раздела двух сред. По интенсивности и направлению отраженных волн судят о месте, протяженности и глубине залегания дефекта. Для обнаружения дефекта необходимо, чтобы поперечные размеры его были не меньше длины ультразвуковой волны.

Поверхностные дефекты отливок в виде трещин, пор и раковин, пригара и ужимин выявляют различными методами. Видимые дефекты обнаруживают при визуальном осмотре путем сравнения с эталоном. Невидимые поверхностные дефекты определяют с помощью люминесцентной, магнитной и цветовой дефектоскопии.

При люминесцентном методе на поверхность отливки наносят слой раствора, способного светиться в ультрафиолетовых лучах. Раствор затекает в тонкие трещины, поры и раковины. С поверхности отливки раствор смывают водой и после сушки на нее наносят тонкоизмельченный силикагель, способный впитывать флюоресцирующий раствор, оставшийся в углублениях и трещинах. Отливку устанавливают под источник ультрафиолетового света и по яркому свечению порошка определяют место и размеры поверхностных дефектов.

Магнитную дефектоскопию применяют для выявления в отливках из магнитных сплавов поверхностных трещин шириной более 0,001 мм и внутренних дефектов, расположенных на глубине до 2 мм. Для этого отливку намагничивают и покрывают тончайшим магнитным порошком или суспензией порошка в воде или масле. По искажению силовых магнитных линий и возникновению бугорков из магнитного порошка судят о размерах и форме дефекта.

Метод цветовой дефектоскопии состоит в погружении отливок на 5—10 мин в красную краску, которая проникает в трещины и поры. Затем красную краску удаляют с поверхности отливки и на нее наносят тонкий слой белой краски. После подсушки в местах расположения трещин и пор на белом фоне проявляются их следы в виде красных линий и точек. Чем глубже и крупнее дефекты, тем соответственно ярче и больше их красные следы. После контроля белую краску смывают растворителем.

Шероховатость поверхности контролируют с помощью эталонов и специальных приборов — профилографов и профилометров.

Дефекты отливок исправляют, если это технически возможно и экономически целесообразно. В противном случае отливку бракуют. Наиболее распространенными способами исправления дефектов являются правка, заварка и пропитка.

Правкой исправляют коробление отливок. Для этого на отливку оказывают механическое воздействие — ее пластически деформируют на прессах или молотками и восстанавливают требуемую геометрию.

Поверхностные дефекты исправляют дуговой и газовой сваркой. Для этого дефектное место отливки предварительно разделяют — придают сечению завариваемого места V-образную форму. Дуговой сваркой без подогрева исправляют дефекты чугунных отливок. Для этого применяют стальные, медно-стальные и медно-никелевые электроды.

Значительно шире используют дуговую, аргонодуговую и газовую сварку с подогревом. Во избежание появления больших термических напряжений отливки перед сваркой нагревают (чугунные до 550—700 °С, алюминиевые и магниевые до 350—400 °С); чтобы исключить окисление, применяют специальные флюсы или защитные газы. В большинстве случаев сварку осуществляют сплавом, не отличающимся по составу от сплава отливки. Сварка сопровождается местным нагревом отливки. Такой нагрев может вызвать появление термических напряжений и трещин. Для устранения напряжений отливки после сварки подвергают повторному отжигу. При сварке дефекта искажаются размеры и твердость детали, поэтому необходима повторная термическая и механическая обработка.

Дефекты механически обработанных стальных отливок исправляют пайкой. Для пайки применяют твердые припои Cu—Ni, Cu—Ag и др.

Пропитка является основным способом исправления пористых отливок. Для пропитки широко используют бакелитовый и асфальтовый лаки, натуральную олифу, жидкое стекло и этилсиликат. Пропитку лаками проводят в специальных баках при температуре 150—200 °С под давлением 0,5—0,6 МПа. Жидким стеклом отливки пропитывают при 85—95 °С. Перед пропиткой отливки, чтобы очистить их от масла, промывают в тетрахлориде углерода и подвергают вакуумированию. Длительность пропитки определяется тол-

щиной стенок, размерами пор и свойствами пропитывающего материала. Она колеблется от 0,5 до 1,5 ч. Для отверждения пропитывающего материала отливки нагревают до 125—175 °С (при пропитке жидким стеклом до 100—110 °С) и выдерживают в течение 3—5 ч.

Поверхностные дефекты, существенно не влияющие на прочность отливок, заделывают пастами, состоящими из наполнителя (каменной муки, цемента, металлической стружки), связующего (жидкого стекла, эпоксидной смолы) и отвердителя.

После исправления дефектов отливки вновь подвергают контролю. Перед сдачей на склад чугушные отливки грунтуют или окрашивают; отливки из магниевых сплавов проходят специальную химическую обработку для получения защитной оксидной пленки.

ГЛАВА 8. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОТЛИВОК

Прежде чем приступить к проектированию технологического процесса изготовления отливки, необходимо выбрать наиболее рациональный способ ее производства, который наряду с требующимися служебными свойствами изделия обеспечил бы наиболее высокие технико-экономические показатели производства и экономный расход материалов.

При выборе технологического процесса учитывают вид сплава, назначение и конструкцию изделия, серийность производства, а также производственные возможности цеха (наличие определенного парка формовочных и стержневых машин, плавильных агрегатов, подъемно-транспортного оборудования и пр.).

Технологический процесс изготовления отливки проектируют в определенной последовательности и в соответствии со стандартами ЕСКД (в частности, с ГОСТ 2.423—73), ЕСТД и др. При проектировании поступают следующим образом.

1. На чертеж изделия наносят модельно-литейные указания. Дополненный таким образом чертеж при единичном и мелкосерийном производстве представляет собой основной технологический документ. Он определяет все особенности технологического процесса и является основой для проектирования и изготовления модельного комплекта и выбора других приспособлений (опок, шаблонов и пр.), необходимых для изготовления литейной формы. В массовом и крупносерийном производстве на все объекты модельной оснастки разрабатывают рабочие чертежи и технологию изготовления каждого объекта оснастки.

2. Заполняют технологическую карту, в которой определяют порядок операций и методику изготовления отливки.

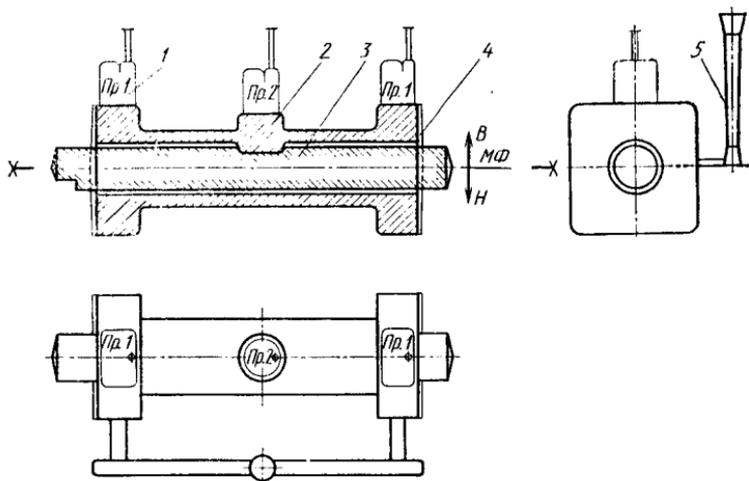


Рис. 60. Техническая разработка отливки:

1 — прибыль; 2 — отливка; 3 — стержень; 4 — припуск на механическую обработку; 5 — литниковая система

3. Вычерчивают чертеж (или эскиз) собранной формы со всеми размерами (см. рис. 2). Он должен давать представление о расположении стержней, литниковой системы, холодильников, выпоров, прибылей. С этой целью вычерчивают минимально необходимое число разрезов формы с тем, чтобы можно было собрать форму, не прибегая к помощи чертежа отливки.

При нанесении технологических указаний на чертеже детали определяют оптимальный разъем модели и формы (рис. 60), положение отливки в форме при заливке; последнее устанавливают в зависимости от конфигурации отливки, вида формы, литниковой системы, требований в отношении плотности металла, шероховатости поверхности и т. д. Для получения плотной отливки в соответствии с принципом направленной кристаллизации наиболее массивные ее узлы располагают при заливке сверху, ответственные поверхности отливки стремятся расположить внизу или вертикально. Положение отливки в форме при заливке указывается стрелками и буквами В (верх) и Н (низ). Разъем модели и формы указывают на всех проекциях буквами МФ.

При определении разъема модели и формы выбирают такой вариант, который обеспечивает наименьшую трудоемкость изготовления модельной оснастки и формы, беспрепятственное удаление модели из формы, повышение размерной точности отливки и уменьшение затрат на очистку и дальнейшую ее обработку. При использовании неразъемных моделей указывают только разъем формы; его обозначают буквой Ф. В том случае, когда отдельные части модели при ее извлечении могут разрушить форму, они выполняются отъемными. Отъемные части удаляют из формы после извлечения основной части модели, так как их устанавливают на

модель и извлекают из формы вручную, что снижает производительность машины. При машинной формовке в этих целях целесообразно применять добавочные стержни.

На чертеже указывают также припуски на механическую обработку. Припуск — слой металла (на сторону), предназначенный для снятия в процессе механической обработки отливки. Величину припусков выбирают в зависимости от способа литья, материала и класса точности отливки, наибольшего размера отливки, а также положения обрабатываемой поверхности в форме в момент заливки. Для отливок из чугуна припуски назначают по ГОСТ 1855—55, из стали по ГОСТ 2009—55. Припуски на механическую обработку для отливок из цветных сплавов в связи с отсутствием ГОСТов назначают по нормам машиностроения. Для тех поверхностей отливки, которые при заливке металлом формы обращены вверх, назначают припуск больший, чем на нижних и боковых поверхностях, так как неметаллические и газовые включения скапливаются обычно наверху.

Для облегчения извлечения модели из формы на ее вертикальных поверхностях (перпендикулярных к плоскости разъема) выполняются уклоны. Уклоны могут быть конструктивными и формовочными. Уклоны, предусмотренные при конструировании отливок, называют конструктивными; размеры отливок в этом случае не изменяются. При отсутствии конструктивных уклонов предусматривают формовочные уклоны, которые влекут за собой изменение размеров отливки (рис. 61).

Для получения на отливках плавных переходов от одной поверхности к другой предусматривают галтели, которые улучшают качество отливок.

Далее, при нанесении технологических указаний на чертеже детали определяют число стержней, оформляющих внутренние полости отливки или отдельные ее внешние части и их границы. Стержням присваивают номера в порядке простановки их в форму. Устанавливают тип литниковой системы, места подвода питателей к отливке. Рассчитывают литниковую систему и показывают на чертеже детали во всех необходимых проекциях, позволяющих получить полное представление о всех ее элементах. Прибыли и выпоры вычерчивают так же, как и литниковую систему — в мас-

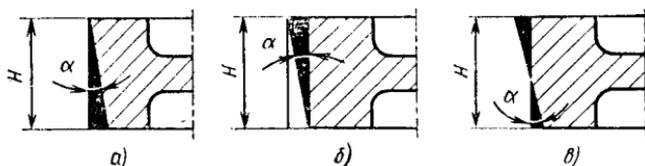


Рис. 61. Формовочные уклоны поверхностей:

а — необрабатываемых, сопрягаемых с другими деталями (за счет уменьшения размера отливки); *б* — обрабатываемых, сверх припуска на механическую обработку (за счет увеличения размера отливки); *в* — необрабатываемых, не сопрягаемых с другими деталями (за счет одновременного уменьшения и увеличения размеров отливки); *H* — высота модели; α — уклон

штабе и во всех необходимых проекциях. Каждой прибыли присваивается порядковый номер.

На чертеже отливки показывают холодильники и другие элементы, применение которых необходимо для получения качественной отливки.

Модельно-литейные указания в соответствии с ГОСТ 2.423—73 должны наноситься на чертеж только черным карандашом.

При машинной формовке по моделям, устанавливаемым на модельную плиту, чертеж с модельно-литейными указаниями дополняют чертежом плиты с расположенными на ней моделями отливки, литниковой системы и спаривающих устройств (см. рис. 20).

Вторым документом, в котором фиксируют технологический процесс, является технологическая карта. Как правило, технологические карты разрабатывают в условиях массового и крупносерийного производства; в мелкосерийном и единичном производстве необходимые технологические указания приводят на чертеже детали.

Технологическая карта определяет как порядок, так и условия выполнения технологических операций при изготовлении отливки. В ней также перечисляют необходимые материалы, оборудование, оснастку, основной и вспомогательный инструмент, норму выработки в смену, разряд рабочих и их число, часовую тарифную ставку и расценки на одну отливку. Для каждого отделения литейного цеха в карте приводят перечень технологических указаний по изготовлению модельного комплекта, стержневых ящиков, литейной формы и стержней, указывают продолжительность и температуру заливки металла в форму, температуру выбивки отливки из формы, способы очистки поверхности отливки, термической обработки и контроля.

С целью получения качественных отливок в технологической карте оговаривают допустимые колебания технологических и теплофизических параметров (свойств формовочных и стержневых смесей, химического состава и температуры заливаемого металла, режима сушки форм и стержней и т. д.). Точное соблюдение технологических указаний является одним из основных условий получения качественных отливок, снижения брака в литейном цехе.

РАЗДЕЛ III

ПРОИЗВОДСТВО ОТЛИВОК ИЗ РАЗЛИЧНЫХ СПЛАВОВ

ГЛАВА 9. ЧУГУННЫЕ ОТЛИВКИ

Чугун является наиболее распространенным материалом для изготовления фасонных отливок. В разных странах, в зависимости от развития машиностроения и других отраслей производства, чугунные отливки составляют 74—83 % от общего числа отливок. Область применения чугуна продолжает расширяться вследствие непрерывного повышения его прочности и эксплуатационных свойств, а также разработки чугунов новых марок со специальными физическими и химическими свойствами. Широкое распространение чугуна получил благодаря хорошим технологическим свойствам и низкой себестоимости по сравнению с другими литейными сплавами.

Чугун — это многокомпонентный сплав железа с углеродом и другими элементами, характеризующийся эвтектическим превращением. Процессы, протекающие при кристаллизации, формирование структуры можно проследить по двойной диаграмме равновесного состояния (рис. 62). По существу здесь представлены две диаграммы: первая — железо—графит, согласно которой весь углерод сплава кристаллизуется в виде графита, а металлическая основа в виде феррита (серый ферритный чугун); вторая — железо—цементит, согласно которой весь углерод кристаллизуется в составе цементита Fe_3C , а металлическая матрица представляет собой перлит (белый чугун).

В половинчатом чугуне наряду с графитом находится структурно свободный цементит. Металлическая основа серых чугунов может быть ферритной, перлитной или перлитно-ферритной. Наличие в чугуне этих составляющих можно объяснить только возможностью смешанной кристаллизации, при которой на различных этапах охлаждения сплава она протекает по стабильной или метастабильной диаграмме.

На характер кристаллизации чугуна, а также форму, размеры и расположение образующихся фаз влияет много факторов. Это прежде всего состав сплава, т. е. содержание элементов, постоянно присутствующих в чугуне (C, Si, Mn, S, P), наличие и концентрация легирующих элементов, а также микропримесей. Большое влияние оказывает скорость охлаждения чугуна, изменение кото-

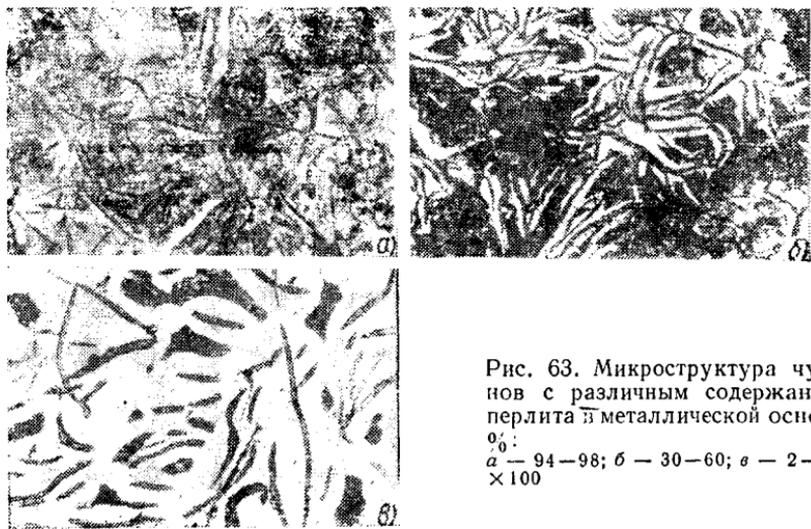


Рис. 63. Микроструктура чугунов с различным содержанием перлита в металлической основе, %:

a — 94—98; *b* — 30—60; *v* — 2—10, $\times 100$

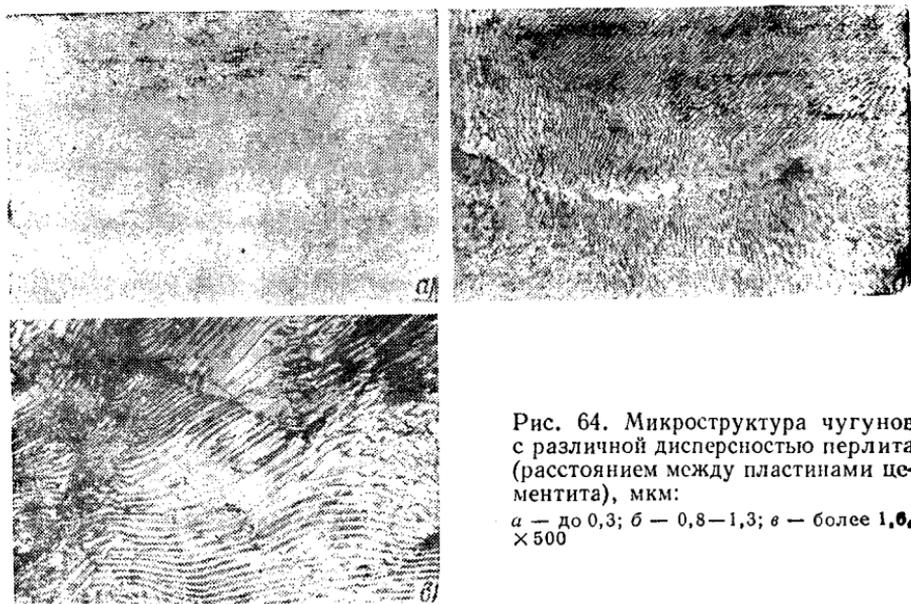


Рис. 64. Микроструктура чугунов с различной дисперсностью перлита (расстоянием между пластинами цементита), мкм:

a — до 0,3; *b* — 0,8—1,3; *v* — более 1,6, $\times 500$

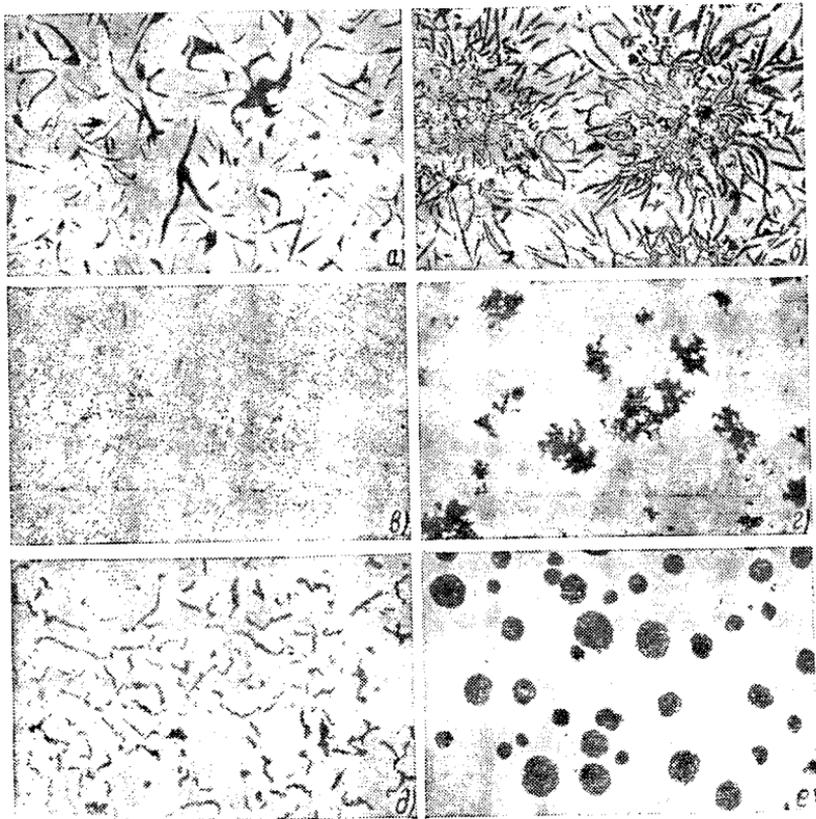


Рис. 65. Распределение и виды графитовых включений, $\times 100$

дывается из ослабления поперечного сечения металлической основы в направлении, перпендикулярном приложению внешней растягивающей силы, и суживающего действия, связанного с изменением длины и плотности силовых линий, следующих разветвлениям металлических мостков, обусловленных хаотическим распределением включений графита.

Графитовые включения оказывают также надрезающее влияние на металлическую основу. Пониманию этого явления помогает схема, показанная на рис. 66. Увеличение плотности силовых линий соответствует повышению напряжений. По краям графитовых включений происходит наибольшее сближение силовых линий. Чем острее край включения, тем больше это сближение у острия и тем больше локальное повышение напряжений. При их определенной величине в надрезанной металлической основе последняя разрушается. Отрицательное влияние графита сказывается тем в меньшей степени, чем меньше количество и размеры его включений и чем более их форма приближается к шаровидной.

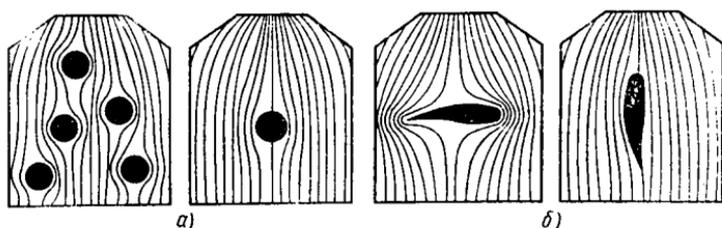


Рис. 66. Зависимость распределения силовых линий в металлической основе чугуна от формы графита:

а — пластинчатый; *б* — шаровидный

В общем случае графит уменьшает временное сопротивление и предел текучести, пластичность (относительное удлинение, ударную вязкость) и модуль упругости.

В то же время, в отличие от стали, чугун менее чувствителен к надрезам. Благодаря этому раковины, поры, неметаллические включения, риски после механической обработки и т. п. в малой степени снижают конструктивную прочность отливки. Подобные же надрезы в стальной отливке резко ухудшают ее свойства, особенно пластичность и усталостную прочность. Эта особенность чугуна объясняется наличием большого количества надрезов, образуемых графитовыми включениями, и высокой циклической вязкостью чугуна. Циклическая вязкость характеризуется энергией, которая рассеивается (переводится в теплоту) при переменных нагрузках в области упругих деформаций. Благодаря этим преимуществам чугун в ряде случаев оказывается более надежным конструкционным материалом, чем сталь.

Наиболее прочной структурной составляющей чугуна является перлит (временное сопротивление $\sigma_{\text{в}} = 700$ МПа) по сравнению с ферритом ($\sigma_{\text{в}} = 400$ МПа при 2 % кремния) и цементитом ($\sigma_{\text{в}} = 20$ МПа). Ферритизация матрицы и появление структурно свободного цементита снижают прочностные свойства сплава.

Таким образом, для повышения прочности чугуна его кристаллизация должна обеспечить:

- уменьшение количества феррита, исключение выделения структурно свободного цементита, получение перлита с наибольшей степенью дисперсности;

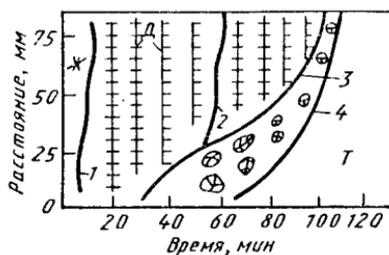
- уменьшение количества графита и размеров его включений;
- приближение формы графита к шаровидной, при которой ослабляется его надрезающее влияние.

§ 2. ПРОЦЕССЫ ФОРМИРОВАНИЯ ЛИТОЙ СТРУКТУРЫ

Формирование литой структуры чугуновой отливки определяется процессами первичной кристаллизации. В зависимости от степени эвтектичности сплава его затвердевание начинается с образования избыточной фазы — аустенита в доэвтекти-

Рис. 67. Кинетика кристаллизации аустенита и эвтектики по сечению (от края к центру) отливки из серого чугуна при литье в песчаную форму:

1 и 2 — начало и конец кристаллизации аустенита; 3 и 4 — начало и конец кристаллизации эвтектики; Ж и Т — соответственно жидкое и твердое состояния; D — дендриты аустенита



ческих чугунах или высокоуглеродистой фазы — в заэвтектических. Наиболее важным и значительным, но одновременно и наименее исследованным является эвтектическое превращение. При анализе процессов необходим всесторонний учет как термодинамических, так и кинетических факторов.

Рассмотрим образование структуры чугуна на примере кристаллизации доэвтектического железоуглеродистого сплава. Его затвердевание начинается с выделения первичного аустенита переменного состава. Аустенит кристаллизуется в виде дендритов, количество и размеры которых определяются строением расплава и условиями его охлаждения. Первичный аустенит выделяется почти во всем объеме медленно кристаллизующейся отливки (рис. 67). При увеличении скорости охлаждения расплава растет объемная и линейная скорость кристаллизации, в результате получают более разветвленные дендриты. Когда скорость кристаллизации ниже скорости теплоотвода, дендриты аустенита растут направленно (рис. 68).

При эвтектическом превращении происходит распад жидкости на аустенит и высокоуглеродистую фазу. Последняя определяет конечную структуру чугуна. Он будет белым, если высокоуглеродистой фазой является цементит, или серым, если высокоуглеродистой фазой является графит. При смешанной кристаллизации получается половинчатый чугун. Характер эвтектической кри-



Рис. 68. Дендриты аустенита в кристаллизующейся отливке

Рис. 69. Ступенчатый рост графитовой лепестки, $\times 1000$

сталлизации существенно влияет на форму, размеры и распределение графитовых включений в сером чугуне.

В случае относительно медленного охлаждения при эвтектическом превращении происходит образование аустенита и графита; последний является ведущей фазой. Аустенит эвтектики частично выделяется на кристаллах первичного аустенита и частично в непосредственном контакте с графитом, образуя аустенитно-графитовые колонии, чаще всего имеющие сферическую форму.

Как известно, кристаллическая структура графита характеризуется заметной анизотропией. Атомы углерода в слое (базисной плоскости) расположены друг от друга на расстоянии 0,1421 нм, в то время как в перпендикулярном направлении расстояние между ближайшими атомами составляет 0,335 нм. Энергия связи углеродных атомов в плоскости базиса почти в 12 раз превышает энергию связи между атомами соседних базисных слоев (призмной грани). Рост графитового включения происходит диффузионным переносом атомов углерода. Образовавшийся в жидкости эвтектического состава графит разрастается не равномерно, а избирательно, преимущественно в направлении, параллельном базисной плоскости, где атомы удерживаются прочнее. С другой стороны, изменяются и условия доставки атомов углерода для достройки граней. Выделяющийся эвтектический аустенит в отдельных местах устраняет контакт графита с жидкой фазой, затрудняет доставку углерода к базисным граням. Фрактограмма на рис. 69 иллюстрирует ступенчатый рост графитового лепестка из жидкой фазы.

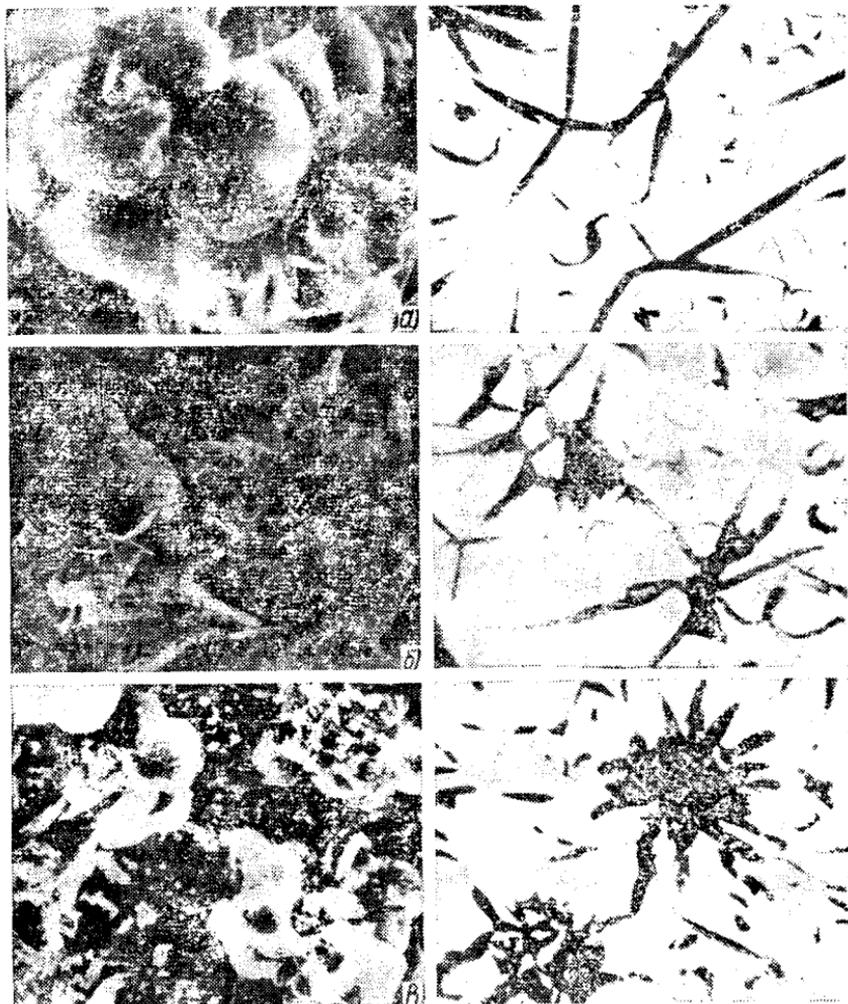
С увеличением скорости охлаждения количество аустенитно-графитовых колоний увеличивается, размер их уменьшается, и графит становится все более мелким. На размеры и распределение графита значительно влияет степень эвтектичности чугуна, т. е. степень приближения сплава по составу к эвтектическому. Степень эвтектичности определяется прежде всего содержанием углерода и количеством элементов (в первую очередь, кремния), уменьшающих концентрацию углерода в эвтектике. Чем меньше степень эвтектичности чугуна, тем большая часть сплава закристаллизовывается в виде первичного аустенита и меньше жидкого расплава остается к моменту начала эвтектического превращения. Это способствует уменьшению количества графита и размельчению его включений.

На условия первичной кристаллизации также влияет присутствие в расплаве неметаллических включений, микропримесей и т. д. Например, Mg, Ce и некоторые другие элементы в количестве нескольких сотых или десятых процента существенно изменяют характер кристаллизации сплава, вызывая последовательное изменение формы графита от пластинчатой до шаровидной.

Существует ряд гипотез для объяснения механизма формообразования графита. Н. Г. Гиршович объединил основные из них в три группы:

гипотезы, устанавливающие определяющую роль природы, строения и формы зародышевой фазы;

гипотезы, связывающие форму графитовых образований с механическим воздействием на растущий кристаллит;



гипотезы, в которых приоритет имеют факторы, выравнивающие скорость роста отдельных граней графитовых включений.

Достаточно широкое распространение получили теории К. П. Бунина, Ю. Н. Тарана, Я. Н. Малиночки, согласно которым эвтектический аустенит, образуя оторочку вокруг растущего графита, выравнивает скорость подвода атомов углерода из жидкой фазы и отвод атомов железа во всех направлениях, благодаря чему графит приобретает шаровидную форму.

Процесс формообразования графита был исследован в Московском институте стали и сплавов А. М. Михайловым, Н. С. Беспаловым, В. И. Воронцовым, Мусой Туни Хассаном. Используя метод скоростного отделения жидкой фазы от закристаллизовавшегося сплава, они подтвердили непрерывность перехода от пла-

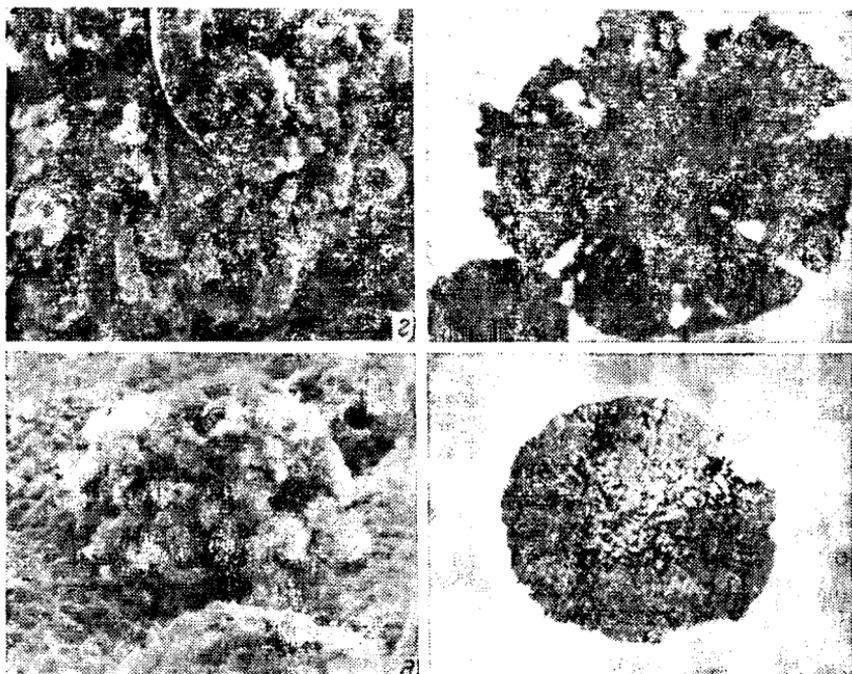


Рис. 70. Изменение формы графита в сплаве железа с 4,6 % С при обработке различным количеством Се, %:
a — 0, $\times 300$; *b* — 0,05, $\times 300$; *c* — 0,15, $\times 300$; *d* — 0,3, $\times 1000$. Слева — фрактограммы поверхности кристаллизации, справа — металлографические шлифы (не травлено)

стинчатой к шаровидной форме, что позволило по-иному представить механизм этого процесса (рис. 70). Открытая поверхность кристаллизации включений дендритов графита позволяет заключить, что они растут в контакте с жидкой фазой не только в области кромок.

На лепестках (ветвях) дендрита графита наблюдаются ступени роста гексагональной формы (см. рис. 69). Утолщение лепестка происходит путем последовательного появления и разрастания на базисной плоскости этих ступеней. Переход от пластинчатой розеточной формы включения к компактной происходит в результате многократного ветвления лепестков, т. е. появления, роста и дальнейшего образования ветвей высших порядков в дендрите графита.

Среди промежуточных форм графита различной степени компактности наибольший интерес представляет вермикулярный графит, который имеет вид коротких и толстых псевдопластин с притупленными концами. Относительно большая округлость включений вермикулярного графита по сравнению с пластинчатым обуславливает повышенные механические свойства чугуна. Строение вермикулярного графита наглядно иллюстрируется

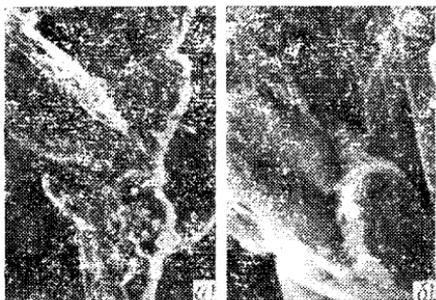


Рис. 71. Вермикулярный графит:
 а — $\times 500$; б — $\times 4500$

фрактограммой (рис. 71), из которой следует, что единичные разобщенные пластины, видимые в плоскости шлифа, на самом деле представляют собой отдельные ветви сложного образования.

Повышение скорости охлаждения сплава и связанное с этим увеличение переохлаждения могут качественно изменить характер продуктов эвтектического превращения. Продолжительность пребывания

сплава в жидком состоянии в период эвтектического превращения, вследствие высокой скорости охлаждения, настолько сокращается, что выделение углерода из жидкой фазы и отдельная кристаллизация графита и аустенита происходят не в полной мере. В результате кристаллизующаяся фаза обогащается железом. В этом случае наряду с аустенитом кристаллизуются и карбиды. Такое торможение кристаллизации графита может быть полным, и выделившаяся высокоуглеродистая фаза будет целиком состоять из карбидов, что приведет к образованию белого чугуна. При промежуточных скоростях охлаждения вместе с графитом кристаллизуются карбиды, что соответствует получению половинчатых чугунов.

Структура чугуна окончательно формируется при эвтектоидном превращении. В сером чугуне к моменту эвтектоидного превращения основными структурными составляющими являются аустенит и графит, образовавшийся при эвтектическом превращении, а также выделившийся из аустенита вследствие уменьшения растворимости углерода в аустените при охлаждении в интервале температур от эвтектического до эвтектоидного превращения.

Эвтектоидное превращение (распад аустенита) связано с перестройкой гранцентрированной решетки (γ -Fe) в кубическую объемно-центрированную (α -Fe) и сопровождается резким изменением растворимости углерода. В результате превращения образуются структуры, состоящие из феррита и высокоуглеродистой фазы.

При очень малых скоростях охлаждения происходит полное диффузионное отделение углерода, выделяющегося в виде графита, преимущественно на его эвтектических включениях. В этом случае окончательная структура чугуна будет состоять из феррита и графита. При скорости охлаждения больше определенного критического значения высокоуглеродистой фазой станет цементит и будет образовываться ферритно-цементитная эвтектоидная смесь — перлит. В перлитных серых чугунах не протекает вторая стадия графитизации и, следовательно, количество графита уменьшается,

а матрица упрочняется. Повышение скорости охлаждения способствует получению более дисперсного перлита. При промежуточных скоростях охлаждения отливки в интервале температур эвтектоидного превращения формируется структура, состоящая из графита, перлита и феррита.

§ 3. ВЛИЯНИЕ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ НА СТРУКТУРУ, МЕХАНИЧЕСКИЕ И ЛИТЕЙНЫЕ СВОЙСТВА ЧУГУНА

На процесс первичной и вторичной кристаллизации чугуна влияют химический состав, скорость охлаждения отливки и состояние расплава. Следовательно, совместное влияние этих факторов определяет конечную структуру чугуна и его механические свойства. Свойства чугуна могут также быть изменены путем термической обработки отливок.

Влияние химического состава. Серые чугуны содержат 2,4—3,6 % С; 0,5—3 % Si; 0,2—1 % Mn; 0,04—0,3 % P; 0,02—0,2 % S. Легированные чугуны содержат большее количество Si, Mn, P и различное количество специальных элементов. Влияние того или иного элемента, входящего в состав чугуна, на структуру, механические и технологические свойства определяется в первую очередь воздействием его на графитизацию. Элементы можно расположить в ряд в зависимости от их положительного или отрицательного влияния на графитизацию: Al, C, Si, Ti, Ni, Cu, P, Co, Zr, Nb, W, Mn, Mo, S, Cr, V, Te, Mg, Sr, B. Элементы, расположенные слева от ниобия, способствуют графитизации, а элементы, расположенные справа от него, — тормозят ее. Влияние элемента тем интенсивнее, чем дальше он расположен от ниобия.

В работах В. К. Григоровича и других авторов показано, что рассмотрение влияния легирующих элементов в чугунах на стабилизацию цементита за счет образования твердых растворов на основе цементита при замещении атомов железа или углерода позволяет уточнить их влияние на графитизацию. На этой основе получены периодическая кривая валентностей элементов и зависимость графитизирующей способности легирующих элементов от заряда ядра. Графитизирующее и карбидообразующее влияние элемента зависит от электронного строения его атома, а следовательно, и от расположения элемента относительно железа в периодической системе.

Углерод и кремний являются графитизирующими элементами и оказывают решающее влияние на структуру и свойства нелегированного чугуна. Из тройной диаграммы состояния Fe—C—Si (рис. 72) следует, что кремний передвигает эвтектическую и эвтектоидную точки влево и вверх, т. е. в сторону уменьшения содержания углерода в жидком и твердом растворах, и повышает температуру превращений. Таким образом, кремний, уменьшая растворимость углерода в жидком и твердом растворах, способствует графитообразованию.

Каждый процент кремния снижает содержание углерода в эвтектике примерно на 0,3 %; для чугуна можно принять

$$C^э = 4,26 - 0,3Si,$$

где $C^э$ — содержание углерода в эвтектике; Si — содержание кремния в чугуне. Поэтому степень эвтектичности чугуна определяют по формуле

$$S_c = C / (4,26 - 0,3Si),$$

где C — содержание углерода в рассматриваемом чугуне.

Степень эвтектичности можно также оценить разностью S'_c содержания углерода в эвтектике и чугуне:

$$S'_c = (4,26 - 0,3Si) - C = 4,26 - (C + 0,3Si).$$

Величину $(C + 0,3Si)$ называют *углеродным эквивалентом* S_c . При $C + 0,3Si = 4,26$ $S'_c = 0$. Чугун, для которого $S_c = 1$ или $S'_c = 0$, является эвтектическим.

Для характеристики влияния углерода и кремния на структуру чугуна предложены структурные диаграммы, одна из которых приведена на рис. 73. Поле диаграммы разделено на пять областей, соответствующих чугунам с определенной структурой:

I — белый чугун ($\Pi + \text{Ц}$);

IIa — половинчатый чугун ($\Pi + \text{Ц} + \Gamma$);

II — серый перлитный чугун ($\Pi + \Gamma$);

IIб — серый перлитно-ферритный чугун ($\Pi + \Phi + \Gamma$);

III — серый ферритный чугун ($\Phi + \Gamma$).

Из диаграммы следует, что регулированием содержания углерода и кремния в чугуне можно получить всю гамму структур чугуна — от белого до серого ферритного. Диаграмма построена для случая, когда другие факторы влияющие на структуру чугуна, поддерживаются постоянными.

Углерод и кремний влияют на структуру чугуна, воздействуя и на дисперсность структурных составляющих.

Результаты экспериментальных исследований (рис. 74) показывают, что повышение углеродного эквивалента S_c увеличивает

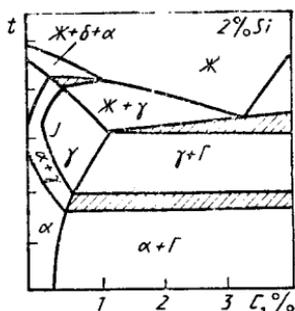


Рис. 72. Вертикальный разрез стабильной тройной диаграммы состояния Fe—C—Si при 2% Si

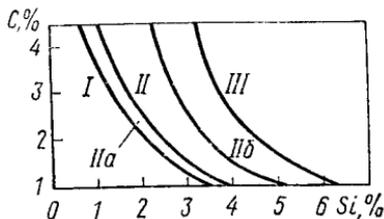


Рис. 73. Структурная диаграмма Н. Г. Гиршовича для чугуна

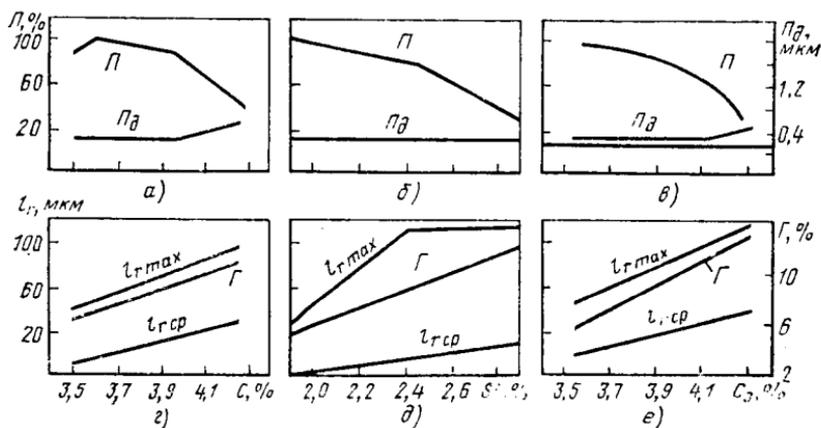


Рис. 74. Влияние C, Si и углеродного эквивалента C_3 на графитизацию и структуру металлической основы чугуна

количество графита Γ и снижает количество перлита Π и одновременно способствует увеличению длины графитовых включений l_{Γ} , а также уменьшению дисперсности перлита (увеличению расстояния между пластинами цементита в перлите Π_d). Следовательно, снижение содержания углерода и кремния обеспечивает повышение прочности чугуна за счет уменьшения количества ферритной составляющей, повышения дисперсности перлита, уменьшения содержания и размельчения графита. Но уменьшить содержание углерода и кремния можно только до определенного предела, обусловленного появлением структурно свободного цементита и связанным с этим снижением механических свойств, повышением твердости и ухудшением обрабатываемости.

Марганец и сера — это элементы, тормозящие графитизацию. Вместе с тем они имеют большое химическое сродство, взаимодействуют с образованием в чугуне сульфидов марганца; при этом их влияние частично нейтрализуется: $FeS + Mn = Fe + MnS$.

Марганец, не связанный с серой, находится в растворе, распределяясь в определенном соотношении между цементитом и аустенитом (ферритом). Марганец снижает температуру $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, расширяет область γ -раствора и способствует стабилизации и повышению дисперсности перлита. Благодаря этому повышение содержания марганца до 1,5 % положительно влияет на механические свойства серого чугуна. Карбидизирующее действие марганца заметно сказывается только при относительно высоком его содержании.

Сера, присутствующая в виде сульфидов, богатых железом, или в составе тройной эвтектики, сильно тормозит графитизацию. При этом существенно снижаются механические свойства из-за образования на границах зерен хрупкой эвтектики, а также ухудшаются литейные свойства чугуна. Нейтрализация этого отрица-

тельного влияния серы на графитизацию и свойства чугуна достигается за счет взаимодействия FeS и Mn . При соотношении $\text{Mn/S} = 4 \div 5$ сера в основном находится в виде сульфидов марганца, не влияющих на графитизацию.

Фосфор, подобно кремнию, уменьшает растворимость углерода в жидком чугуне и сдвигает эвтектическую точку влево. Но в отличие от кремния фосфор снижает температуру эвтектического превращения. Фосфор отличается ограниченной растворимостью в твердом чугуне и большой склонностью к ликвации. Это предопределяет выделение избыточного количества фосфора в виде самостоятельной составляющей — тройной фосфидной эвтектики $\text{Fe}_3\text{P}-\text{Fe}_3\text{C}-\text{Fe}$, плавящейся при 953°C . На графитизацию фосфор оказывает незначительное влияние. Увеличение содержания фосфора, благодаря легированию феррита, вначале способствует повышению механических свойств, затем вследствие выделения фосфидной эвтектики в виде крупных включений или сетки по границам зерен снижает прочность. Критическое содержание фосфора зависит от типа чугуна, содержания других элементов и составляет $0,3-0,8\%$.

Из газов в чугунах чаще всего встречаются азот, водород и кислород, а также различные их соединения.

Растворимость азота в жидком чугуне зависит от температуры, при повышении которой содержание растворенного азота увеличивается. Растворимость также зависит от химического состава. В чугунах ваграночной плавки после затвердевания содержание азота удовлетворительно описывается уравнением $[\text{N}] = 0,089^e - 0,728\text{C}_p$. В зависимости от формы состояния азот оказывает различное воздействие на структурообразование и свойства чугуна. Так, при образовании фаз внедрения он повышает стабильность карбидов и способствует повышению прочности и твердости чугуна. Это влияние может быть использовано на практике при получении высококачественного чугуна. Азот, входящий в нитриды различных элементов, может изменять характер графитизации сплава. Введение азота в чугун, содержащий бор или титан в количестве, соответствующем образованию нитридов, способствует графитизации за счет подавления карбидизирующего влияния этих элементов и, возможно, зародышевого действия образующихся нитридов на кристаллизацию графита.

На растворимость водорода в чугуне влияют температура, химический состав чугуна, условия его выплавки. При этом существенно изменяются и формы состояния водорода в чугуне. Нужно учитывать, что наибольшее количество (80 %) приходится на его диффузионно подвижную форму. Остаточное содержание мало-диффузионных форм составляет в $0,1$ кг серого чугуна ваграночной плавки до 30 см^3 . В чугунных отливках водород распределяется неравномерно, и его ликвация может проявляться чаще и резче, чем других элементов. В связи с существенной разницей в соотношении различных форм водорода в чугуне встречаются противоречия в оценке его влияния на свойства жидкого и твердого чугунов. Водород может способствовать увеличению стабильности карбидов и склонности чугуна к отбеливанию, выделению аномальных форм графита и повышению дисперсности перлита.

Кислород как в жидком, так и в твердом чугуне может находиться в разных состояниях — в основном в виде простых или сложных оксидных включений, а также в растворе. Общее количество, а также форма состояния кислорода предопределяются химическим составом чугуна, условиями плавки, внепечной обработки, заливки и т. п. Растворенный в расплавленном чугуне кислород может способствовать дезактивации части центров графитизации и приводить к повышению отбеливаемости. Наряду с этим увеличение количества и дисперсности ок-

сидных включений сопровождается развитием процесса графитизации. Так, при модифицировании чугуна ферросилицием повышается содержание кислорода, сопровождающееся увеличением количества оксидов, служащих центрами кристаллизации графита. Это приводит к значительному уменьшению склонности чугуна к отбеливанию. При содержании азота или водорода в металле сверх равновесного значения в отливках возможно образование пористости, которая обычно концентрируется у поверхности.

Для повышения прочности чугуна, а также получения чугунов со специальными свойствами проводят их легирование различными элементами. Чаще всего для этой цели применяют хром, никель, молибден, медь, алюминий, титан, ванадий. Влияние этих элементов на кристаллизацию и структуру чугуна различно и во многом зависит от характера их распределения между структурными составляющими чугуна, а также их воздействия на положение основных критических точек диаграммы Fe—C.

Все легирующие элементы можно подразделить на три группы. К первой относятся элементы (Ni, Cu и др.), которые в основном образуют растворы с ферритом (аустенитом). Эти элементы понижают растворимость углерода в жидком и твердом растворах, а также содержание углерода в эвтектике и эвтектоиде, повышают эвтектическую температуру, одновременно снижая эвтектоидную. Это обуславливает графитизирующее влияние элементов. Действие их на эвтектическую кристаллизацию аналогично кремнию. В то же время никель, способствуя графитизации структурно свободных карбидов, тем самым стабилизирует перлит и способствует повышению его дисперсности. Аналогично, но в более слабой степени влияет на графитизацию медь.

Ко второй группе относятся элементы (Cr, Mo, V и др.), образующие растворы замещения преимущественно с цементитом, например $(Fe, Cr)_3C$ — $(Fe, Mo)_3C$ — $(Fe, V)_3C$. При превышении определенной концентрации эти элементы образуют специальные фазы—карбиды (например, Cr_7C_3 и V_4C_3) и тем самым тормозят графитизацию и вызывают размельчение графитовых включений.

Элементы третьей группы (Ti, Zr и др.) вследствие высокой химической активности практически целиком расходуются на образование карбидов, нитридов, оксидов и только в небольшом количестве растворяются в феррите и цементите. Тугоплавкие включения, образующиеся еще в жидком расплаве, могут служить центрами кристаллизации графита. Поэтому титан, являющийся карбидообразующим элементом, в то же время способствует графитизации и размельчению графитовых включений.

Все указанные элементы в процессе вторичной кристаллизации тормозят распад аустенита. При этом повышается степень переохлаждения при эвтектоидном превращении, что приводит к получению более дисперсного перлита, даже при относительно медленном охлаждении отливки. Такие элементы, как никель, медь и марганец, расширяющие область γ -раствора и понижающие температуру мартенситного превращения, способствуют получению аустенитной структуры.

Легирующие элементы, воздействуя на кристаллизацию чугуна, обеспечивают повышение механических свойств. Особенно сильно влияющие молибден, ванадия, хрома, обуславливающее размельчение графитовых включений и упрочнение металлической матрицы. Никель и медь увеличивают прочность в меньшей степени. Их положительная роль связана только с повышением количества и дисперсности перлита и выравниванием свойств в тонких и толстых сечениях отливки.

Ковшовое легирование. Введение легирующих элементов в чугун, находящийся в ковше, позволяет снижать потери элементов в результате окисления и регулировать свойства чугуна после выдачи его из печи. Ковшовым легированием можно получить широкий диапазон марок чугунов, обладающих различными свойствами, но выплавленных на единой шихте.

Полнота растворения легирующих добавок зависит от температуры чугуна при выпуске из печи, а также от усвояемости вводимых материалов, которая определяется их составом и размером кусков. В некоторых случаях для повышения эффективности процесса растворения используют встряхивающие стелды или продувку газом чугуна в ковше.

При ковшовом легировании наиболее часто используют гранулированные никель и медь, ферросиликохром, ферромolibден, электролитический марганец, а также комплексные легирующие сплавы на основе кремния. Для стабилизации перлита в структуре и повышения износостойкости чугун легируют малыми добавками (0,01—0,1 %) сурьмы, олова или бора.

Влияние скорости охлаждения. Скорость охлаждения отливки зависит от ряда факторов. В первую очередь, к ним относятся приведенная толщина отливки R , коэффициент теплоаккумулирующей способности формы b_f , температура заливки. Независимо от того, под влиянием каких факторов изменилась скорость охлаждения, ее повышение увеличивает переохлаждение и повышает дисперсность структурных составляющих. В зависимости от химического состава и жидкого состояния чугуна, при известной степени переохлаждения, эвтектическая кристаллизация может частично или полностью проходить по метастабильной системе. Скорость охлаждения в интервале эвтектоидного превращения определяет соотношение феррита и перлита, а также степень дисперсности последнего.

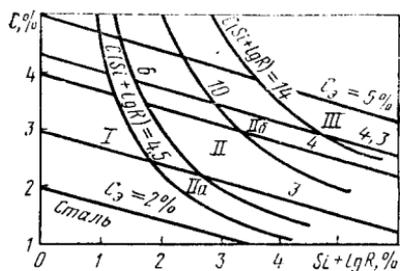


Рис. 75. Структурная диаграмма, построенная с учетом состава чугуна и приведенной толщины стенки отливки

Связь между структурой чугуна и толщиной отливки, в наибольшей степени влияющей на скорость охлаждения, можно проследить по диаграмме Н. Г. Гиршовича (рис. 75). Скорость охлаждения изменяет структуру и тем самым влияет на механические свойства чугуна. Это наглядно иллюстрируется результатами экспериментов, полученными при изготовлении в сухой песчаной

Скорость охлаждения и механические свойства
в различных сечениях отливки массой 750 кг

Толщина стенки отливки, мм	Средняя скорость охлаждения в форме до 950 °С, °С/ч	Временное сопротивление, МПа	Твердость НВ
14	350	310—335	229
32	190	285—300	202
85	100	230—260	187

форме отливки массой 750 кг из чугуна, содержащего 3,15 % С и 1,72 % Si (табл. 12).

Как следует из табл. 12, различные сечения отливки имеют различные механические свойства, что может быть выражено следующей показательной функцией:

$$\sigma_{D_1}/\sigma_{D_2} = (D_2/D_1)^m,$$

где σ_{D_1} и σ_{D_2} — механические свойства брусков диаметрами соответственно D_1 и D_2 ; m — коэффициент однородности.

Чем больше значение m , тем больше отличаются свойства в различных сечениях отливки.

Влияние состояния расплава. Наряду с химическим составом чугуна и скоростью его охлаждения на кристаллизацию чугуна влияют физические свойства жидкого расплава (вязкость, поверхностное и межфазное натяжение), а также наличие различных включений. Этот комплекс, характеризующий жидкое состояние чугуна, зависит от факторов, к которым относятся перегрев, выдержка жидкого чугуна при температуре перегрева и модифицирование.

Перегрев и выдержка. Экспериментально установлено, что повышение температуры перегрева жидкого чугуна более 1500 °С способствует увеличению количества связанного углерода. Так же действует выдержка чугуна в жидком состоянии.

Установлено также, что повышение температуры перегрева приводит к размельчению графитовых включений. При этом проявляется тенденция к кристаллизации мелкого точечного графита с междендритным расположением. Тенденция проявляется тем сильнее, чем меньше содержание углерода в чугуне. В результате перегрев жидкого чугуна в определенном интервале температур способствует повышению механических свойств. Но такое благоприятное влияние сказывается только до критических температур, при превышении которых механические свойства начинают падать из-за образования междендритного графита. Эта критическая температура для различных чугунов различна. Она зависит от ряда факторов, основным из которых является содержание углерода.

Чем выше содержание углерода в чугуна, тем до более высоких температур допустим перегрев его без образования междендритного графита. Таким образом, перегрев до определенных пределов является одним из действенных методов повышения прочности чугуна.

М о д и ф и ц и р о в а н и е. Механизм воздействия модификаторов на процесс кристаллизации чугуна различен. Одна группа модификаторов воздействует на условия роста графита и способствует его кристаллизации в виде компактных или шаровидных включений. Другая группа обеспечивает образование дополнительных вынужденных зародышей и, таким образом, изменяет степень графитизации. При графитизирующем модифицировании уменьшается степень переохлаждения, измельчается эвтектическое зерно и обеспечивается получение однородной структуры с мелкопластинчатым графитом в сечениях отливки различной толщины. По сравнению с обычным чугуном модифицированный чугун такого же химического состава в меньшей степени склонен к отбеливанию и образованию междендритного точечного графита. Именно на этом основано использование модифицирования для получения чугунов с высокими механическими свойствами.

В качестве графитизирующего модификатора наибольшее распространение получил 75 %-ный ферросилиций, эффективность которого значительно усиливается при содержании в нем 1—2 % Al и Ca. Еще более сильное графитизирующее действие оказывают комплексные модификаторы на основе ферросилиция, содержащие небольшое количество Sr, Ba, Zr и некоторых других химически активных элементов в различных сочетаниях.

Существуют различные теории, объясняющие механизм действия комплексных модификаторов. В соответствии с одной из них введение кремния в жидкий чугун вызывает развитие гетерогенности и повышение активности углерода в локальных объемах расплава. В этих условиях значительно облегчается процесс активации графитовыми комплексами неметаллических включений, образованных Al, Ca, Ba, Sr и другими элементами, содержащимися в модификаторе, и их взаимная коагуляция,

Существуют и другие составы комплексных модификаторов, например, содержащие силициды редкоземельных металлов или механическую смесь FeSi, CaSi, SiC и графита. Выбор того или иного состава определяется характером технологического процесса и требованиями к отливкам.

Таким образом, уменьшение содержания углерода и кремния, перегрев чугуна ($t_{пер}$), повышение скорости охлаждения ($v_{охл}$) до определенного предельного значения способствует улучшению механических свойств чугуна. Этот предел обусловлен выделением структурно свободного цементита и междендритного графита, приводящих к снижению механических свойств (рис. 76, кривая 1). Графитизирующее модифицирование позволяет использовать положительное влияние указанных факторов в более широком ин-

тервале без отбеливания или появления междендритного графита. При этом допустимое значение этих факторов сдвигается вправо, а максимум механических свойств достигает более высоких значений (кривая 2).

Термическая обработка. В зависимости от температуры и методов нагрева отливок, выдержки и условий их охлаждения термическая обработка чугуна может обеспечивать снятие остаточных напряжений, графитизацию или повышение твердости и механических свойств.

Снятие остаточных напряжений. Для этой цели применяют низкотемпературный отжиг при 550—650 °С. Структура и в большинстве случаев механические свойства не изменяются. После кратковременной выдержки (3—4 ч) при этих температурах отливки медленно охлаждаются вместе с печью со скоростью 8—30 °С/ч до 100—150 °С. Чем меньше скорость охлаждения, тем полнее снятие остаточных напряжений.

Графитизирующий отжиг. Цель этого отжига — стабилизация структуры, т. е. разложение структурно свободного цементита или цементита в перлите (ферритизация). На практике применяют одностадийный или двустадийный отжиг при температурах надкритической или подкритической области. Для снижения твердости и улучшения обрабатываемости серого чугуна применяют одностадийный отжиг. При этом частично или полностью разлагается перлит и снижаются механические свойства серого чугуна. Для разложения структурно свободного цементита применяют отжиг при температурах выше критических, продолжительность выдержки зависит от количества подлежащего разложению цементита.

Такой отжиг является основой технологического процесса получения ковкого чугуна из белого. Для получения ковкого чугуна с ферритной основой применяют двустадийный отжиг с выдержкой при температурах надкритической области (разложение структурно свободного цементита) и с последующей выдержкой при температурах подкритической области или с медленным охлаждением в области критических температур (разложение перлита).

Нормализация, закалка, отпуск. Нормализация и закалка чугуна способствуют повышению его твердости (при этом возрастает износостойкость) и механических свойств. Отливки нагревают до температур выше критических и после выдержки охлаждают с большей или меньшей скоростью. При нор-

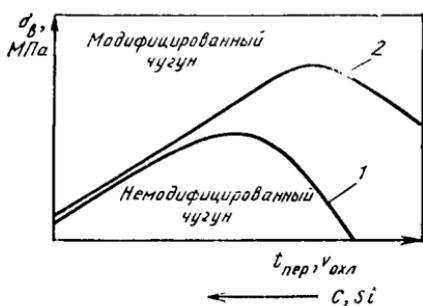


Рис. 76. Влияние состава и технологических факторов на механические свойства чугуна

мализации охлаждение проводят вне печи — на воздухе. При закалке отливки погружают в охлаждающую жидкость (воду, масло и др.).

При нормализации нагрев осуществляют до 900—1000 °С и выдерживают в течение времени, обеспечивающего частичное растворение графита и насыщение аустенита углеродом. Более богатый углеродом аустенит при относительно быстром охлаждении и температурах эвтектоидного превращения распадается без выделения феррита. В этом случае получают более дисперсные перлитобразные структуры, что вызывает повышение твердости и механических свойств.

При закалке быстрое охлаждение из области аустенитного состояния способствует получению неравновесных структур, свойственных железоуглеродистым сплавам (мартенситу, трооститу). Как правило, после закалки проводят отпуск при температуре 200—500 °С, что уменьшает закалочные напряжения в отливке и изменяет структуру, например, мартенсит переходит в троостит или сорбит. В зависимости от температуры отпуска повышаются механические свойства и снижается твердость.

В результате термической обработки чугуна видоизменяется только основная металлическая матрица. Форма графита остается неизменной, и может лишь несколько уменьшиться его количество. Поэтому наибольший эффект достигается при закалке чугуна с перлитной матрицей и мелкопластинчатым графитом или графитом шаровидной формы.

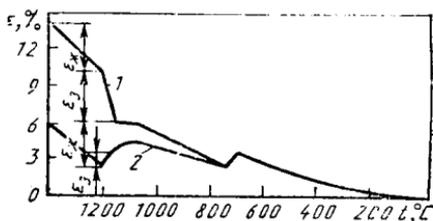
Поверхностная закалка. Вследствие низкой пластичности чугуна при объемной закалке в отливках могут образовываться трещины. В связи с этим прибегают к поверхностной закалке чугунных деталей, работающих на износ, например, поверхностей трения станин металлорежущих станков. Нагрев газовыми горелками или токами высокой частоты с последующим водоструйным охлаждением способствует получению закаленного слоя глубиной 1,5—4 мм.

Изотермическая закалка. При закалке в соляную ванну или другую жидкую закалочную среду при температуре 300—400 °С с последующей выдержкой чугун приобретает бейнитную структуру. Это обеспечивает высокие механические свойства и износостойкость, причем вследствие сравнительно низкого уровня напряжений опасность образования трещин и короблений снижается. Такая же структура и еще более высокие свойства могут быть получены и без термической обработки путем комплексного легирования чугуна молибденом и никелем.

Литейные свойства. Чугун отличается сравнительно высокими литейными свойствами, что обусловлено его химическим составом, низкой температурой начала кристаллизации, а также графитизацией.

Жидкотекучесть большинства сплавов зависит от положения на диаграмме состояния, и она тем выше, чем меньше

Рис. 77. Объемная усадка ϵ белого (1) и серого (2) чугунов при охлаждении ($\epsilon_{ж}$ — усадка в жидком состоянии; ϵ_3 — усадка при затвердевании)



интервал затвердения. Чугун характеризуется аномальным характером жидкотекучести, которая при увеличении содержания углерода и кремния повышается, но достигает максимума не при эвтектическом ($C_s = 4,3$), а при заэвтектическом составе ($C_s = 4,7 \div 4,9$). Это связано со способностью заэвтектических чугунов сохранять текучесть в определенном интервале температур ниже ликвидуса, поскольку кристаллизация первичного графита сопровождается значительным тепловым эффектом. Заметный рост жидкотекучести наблюдается также при повышении содержания фосфора в сплаве.

У с а д к а. Характер усадки серого чугуна в значительной степени определяется процессом графитизации. Уменьшение объема чугуна при охлаждении в жидком состоянии практически постоянно. В период затвердевания усадка связана с изменением агрегатного состояния и особенно с графитизацией.

Объем белого чугуна уменьшается всегда. В сером чугуне вследствие выделения графита из жидкой фазы в заэвтектических чугунах и при эвтектической кристаллизации происходит расширение, компенсирующее усадку тем полнее, чем больше образуется графита. На рис. 77 показан случай, когда в процессе затвердевания серого чугуна заэвтектического состава происходит отрицательная усадка, т. е. объемное расширение. Величина объемной усадки при затвердевании белого чугуна составляет 4—5 %, серого — (—1,5) — 3 %.

При охлаждении чугуна в твердом состоянии изменение объема (линейная усадка) определяется двумя процессами: выделением графита в связи с уменьшением его растворимости в аустените и термическим сжатием матрицы сплава. Именно с графитизацией связано предусадочное расширение. Послеперлитная линейная усадка серого и белого чугунов одинакова и составляет 0,9—1,1 %, тогда как доперлитная усадка серого чугуна (0—0,3 %) значительно меньше, чем белого чугуна (0,7—1 %).

Особенности протекания усадочных процессов в сером чугуне и относительно малая усадка при кристаллизации и в твердом состоянии существенно облегчают задачу получения качественных отливок. В отливках из серого чугуна реже, чем в стальных или в отливках из белого чугуна, образуются усадочные раковины, трещины и т. д. Это позволяет изготавливать отливки из серого чугуна часто без применения прирублей.

§ 4. ОТЛИВКИ ИЗ СЕРОГО ЧУГУНА

Из конструкционных чугунов изготавливают 80 % всех производимых чугунных отливок. Основными потребителями являются различные отрасли машиностроения (автомобильное, тракторное и сельскохозяйственное машиностроение, тяжелое машиностроение, станкостроение и др.). Наиболее распространенные марки чугуна приведены в табл. 13. Согласно ГОСТу, механические свойства чугунов определяются по результатам испытаний на растяжение образцов, вырезанных из отдельно залитых цилиндрических брусков диаметром 30 мм.

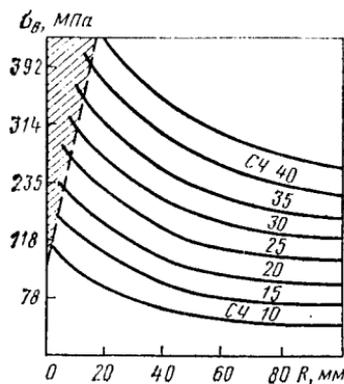
Вследствие чувствительности чугуна к изменению скорости охлаждения прочность в различных узлах отливки может отличаться от прочности, характеризующей данную марку (рис. 78). Конструктор выбирает марку чугуна, исходя из требуемых механических свойств в наиболее нагруженных сечениях отливки.

Литейщик должен выбирать состав чугуна и технологический процесс его получения с учетом влияния различных факторов на структуру чугуна и его механические свойства. При получении чугунов повышенной прочности (СЧ 25, СЧ 30, СЧ 35, СЧ 40), а также в тех случаях, когда техническими условиями предусматриваются дополнительные требования, технология может оказаться сложной. Например, отливки, подвергающиеся в процессе эксплуатации повышенному износу (отливки металлорежущих станков, детали двигателей и т. п.), требуют повышенной твердости рабочих поверхностей и определенной микроструктуры чугуна (дисперсности перлита, размеров и расположения графитовых включений и т. д.).

При производстве чугунов высоких марок используют модифицирование, легирование и термообработку.

Модифицированный чугун. В качестве графитизирующего модификатора используется ферросилиций ФС75Л (74 — 80 Si),

Таблица 13



Механические свойства
серого чугуна (ГОСТ 1412—79)

Чугун	Предел прочности, МПа, не менее		Твердость НВ
	при растяжении	при изгибе	
СЧ 15	147	314	163—229
СЧ 20	196	392	170—241
СЧ 25	245	451	180—250
СЧ 35	343	539	197—209

Рис. 78. Влияние толщины стенки отливки, охлаждавшейся в песчаной форме, на механические свойства чугуна. Зона отбела заштрихована

Технологические варианты получения модифицированного чугуна повышенной прочности

Вариант	Массовая доля, %, элементов в чугуне *				Углеродный эквивалент
	С	Si		Mn	
		До модифицирования	После модифицирования		
I	2,8—3	0,8—0,9	1,3—1,5	1,4—1,6	3,3
II	2,9—3,1	0,9—1	1,3—1,5	1,2—1,4	3,45
III	3—3,2	1,1—1,2	1,4—1,6	1—1,2	3,55
IV	3,1—3,3	1,3—1,4	1,5—1,7	0,8—1	3,7
V	3,2—3,4	1,5—1,6	1,7—1,9	0,8—1	3,8

Вариант	Присадка стального лома, %	Температура чугуна при выпуске из печи, °С, не ниже	Количество ферросилиция, %	Марка чугуна	Минимальная толщина стенки отливки без отбела, мм
I	60—70	1450—1460	0,8—1	СЧ 40	23
II	45—55	1440—1450	0,6—1	СЧ 35	19
III	35—40	1420—1430	0,4—0,6	СЧ 30	15
IV	20—25	1410—1420	0,3—0,5	СЧ 25	13
V	15	1400	0,1—0,3	СЧ 20	10

* Содержание серы до 0,18 %, фосфора до 0,3 %.

комплексные сплавы на основе кремния, содержащие Ca, Mg, Sr, Zr, Ba, PЗМ, Mn, а также модифицирующие смеси, состоящие из силикокальция, графита, ферросилиция и других компонентов.

Модификатор в виде кусков размером 1—5 мм вводят в струю чугуна при сливе из печи в ковш. Для конкретных условий производства устанавливают оптимальный интервал времени от момента заполнения ковша до заливки форм, так как при превышении этого времени действие модификатора постепенно исчезает.

Эффективность модифицирования может быть повышена при введении добавок непосредственно в процессе заливки формы. Практически это реализуется путем размещения модификатора в одном из элементов литниковой системы формы или с помощью проволоки из прессованного порошкообразного модификатора, которая с заданной скоростью вводится в струю металла у литниковой чаши формы.

Высокие механические свойства модифицированного чугуна достигаются благодаря снижению расчетного содержания углерода и кремния, высокому перегреву чугуна в сочетании с модифицированием и повышением содержания марганца.

В табл. 14 приведены технологические варианты получения модифицированных чугунов повышенной прочности. Из табличных данных следует, что по мере повышения требований к механиче-

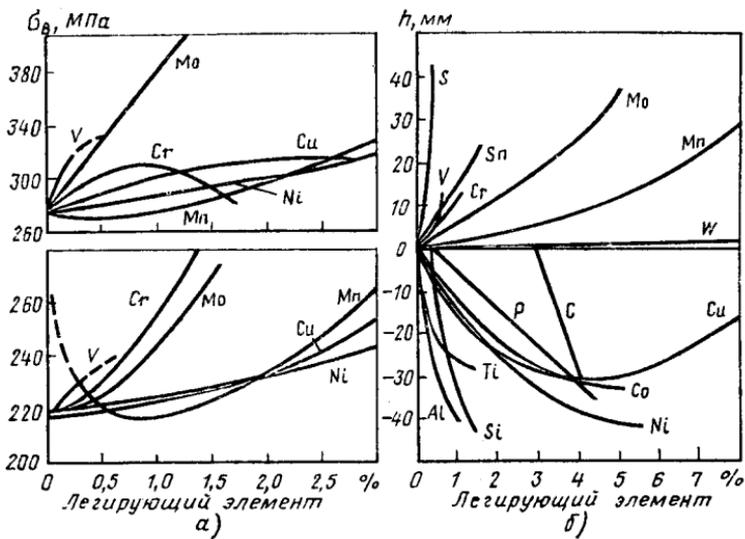


Рис. 79. Влияние легирующих элементов на механические свойства (а) и глубину отбела h (б) серого чугуна следующего состава, %:
3,24 С, 1,88 Si, 0,71 Mn, 0,17 P, 0,09 S

ским свойствам содержание углерода в чугуне должно снижаться, марганца повышаться, его перегрев увеличиваться. Одновременно должно увеличиваться количество модифицирующих добавок для предотвращения отбеливания чугуна и выделения междендритного графита.

Эффективным и широко используемым методом улучшения структуры и повышения механических свойств чугуна является применение в шихте стального лома. В модифицированном чугуне высших марок доля стального лома составляет 50—70 %. При сравнении чугунов одинакового химического состава было установлено, что чугуны, выплавленные на шихте со стальным ломом, имеют более мелкий графит и повышенные механические свойства. Положительное влияние присадки стали проявляется и в том, что снижается содержание углерода в шихте, а следовательно, и в выплавленном чугуне. Хотя модифицирование чугуна и уменьшает его склонность к отбеливанию, однако для каждой марки указаны минимальные толщины стенки отливки, получаемые без структурно свободного цемента.

Легированный чугун. В качестве конструкционного материала применяют низколегированный чугун (общее содержание легирующих элементов до 3 %). Для легирования используют в основном Cr, Mn (при содержании свыше 1 %) Ni, Mo, Cu, V, Ti.

Все эти элементы (за исключением Ti) препятствуют выделению феррита и повышают дисперсность перлита. Наиболее интенсивно повышают механические свойства (рис. 79, а) элементы, измельчающие графит (V, Mo, Cr). Элементы, способствующие гра-

фитизации (Ni, Cu, Ti), предотвращают отбеливание чугуна в тонких сечениях отливки, а элементы, тормозящие графитизацию (V, Cr, Mn, Mo), увеличивают склонность к отбеливанию (рис. 79, б). Склонность чугуна к отбеливанию приближенно характеризуется константой графитизации

$$K_r = C [\text{Si} - 0,2 (\text{Mn} - 1,75\text{S} - 0,3) + \\ + 0,1\text{P} + 0,4\text{Ni} - 1,2\text{Cr} + 0,2\text{Cu} + 0,4\text{Ti} - 0,4\text{Mo} - 2\text{V}].$$

Интенсивность и характер влияния каждого элемента оценивают абсолютной величиной коэффициента и знаком перед ним. Сравнение значений K_r различных легированных и нелегированных чугунов облегчает выбор оптимального химического состава, исходя не только из желаемой структуры и прочности рабочих узлов, но и из условия получения легко обрабатываемого серого чугуна без отбела в тонких сечениях отливок.

К серому чугуну со специальными свойствами предъявляют особые требования, связанные с условиями эксплуатации отливок. В некоторых случаях эти требования могут удовлетворить нелегированные или низколегированные чугуны. Так, повышенные эксплуатационные свойства антифрикционного чугуна для подшипников, втулок и других деталей обеспечиваются малым легированием Cr, Ni, Cu, Ti, Sb, Mn и др.

Немагнитные отливки, применяемые в электромашиностроении, имеют аустенитную структуру и изготавливаются из высоколегированного чугуна. Получение заданной структуры достигается легированием 14—33 % Ni и 2—8 % Cu и Cr. Вследствие дефицитности никеля его частично или полностью заменяют марганцем, однако специальные и механические свойства этих чугунов ниже.

Отливки из коррозионно-стойкого чугуна применяют в основном в химическом аппаратостроении. Коррозионную стойкость можно оценить массой металла (в граммах), превращенного в продукт коррозии за единицу времени (1 ч) с единицы поверхности (1 м²) при действии внешней агрессивной (коррозионной) среды (азотной, серной, фосфорной кислот, соли, щелочи и др.). В зависимости от эксплуатационных условий используют аустенитные чугуны, легированные 15—40 % Ni в сочетании с Cu и Cr.

Особое место занимают высококремнистые сплавы типа ферросилида. Благодаря высокому содержанию кремния (14—16 %) их можно отнести к чугунам со степенью эвтектичности, близкой к единице.

Из износостойких чугунов, используемых главным образом в автотракторной промышленности, изготавливают литые детали, работающие в узлах трения. Комплексное легирование Cr, Ni, Mo, V, Cu, B, P обеспечивает получение средне- и крупнопластинчатого графита, прочной дисперсной перлитной матрицы и структурно свободных карбидов в виде отдельных равномерно распределенных включений или разорванной сетки, располагающейся по границам эвтектических зерен.

§ 5. ОТЛИВКИ ИЗ КОВКОГО ЧУГУНА

Ковкий чугун является конструкционным материалом, используемым для изготовления мелких тонкостенных отливок для сельскохозяйственных машин, автомобилей, тракторов, арматуры, фитингов и других деталей массового производства (табл. 15). Благодаря компактной форме графита (углероду отжига) чугун отличается высокими механическими свойствами и пластичностью, занимая в этом отношении промежуточное положение между серым чугуном и сталью.

Т а б л и ц а 15

Механические свойства ковкого чугуна
(ГОСТ 1215—79)

Марка	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость НВ
	Не менее		
КЧ 35-10	333	10	100—163
КЧ 50-5	490	5	170—230
КЧ 60-3	588	3	200—269
КЧ 80-1,5	784	1,5	270—320

Ферритный ковкий чугун обладает высокой пластичностью, сопротивлением ударным нагрузкам и однородностью механических свойств по сечению отливок. Второй особенностью ферритного ковкого чугуна является возможность одновременного повышения прочности и пластичности, тогда как в других железоуглеродистых сплавах повышение

прочности всегда сопровождается снижением пластичности. Это объясняется тем, что при уменьшении размера и повышении степени компактности графитовых включений снижается концентрация напряжений, что способствует повышению пластичности и одновременно положительно влияет на прочность.

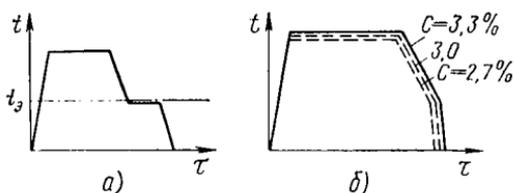
Перлитный ковкий чугун обладает высокой прочностью и средней пластичностью, хорошими антифрикционными свойствами и высокой износостойкостью, которая значительно повышается при легировании.

Основной особенностью технологии является изготовление отливок из белого чугуна без включений пластинчатого графита, который ухудшает механические свойства. Увеличение толщины стенок и массы отливки значительно затрудняет получение чисто белого излома, поэтому область использования ковкого чугуна ограничивается тонкостенными (до 50 мм) отливками массой в несколько десятков килограммов.

Конечную структуру чугуна без структурно свободного цемента получают после отжига. В зависимости от химического состава чугуна и режима отжига можно получить ферритную, перлитную или перлитно-ферритную металлическую основу.

Различают два вида ковкого чугуна: черносердечный (темный бархатистый излом) и белосердечный (блестящий светлый излом). Целью отжига чугуна на черносердечный является разложение структурно свободных карбидов. Обезуглероживается только

Рис. 80. Режимы отжига белого чугуна на ковкий черносердечный (а) и белосердечный (б) (t_3 — температура эвтектоидного превращения)



поверхностный слой толщиной до 0,5 мм, а содержание углерода в остальном сечении не изменяется. Это достигается применением нейтральной атмосферы.

При отжиге чугуна на белосердечный наряду с графитизацией преследуется еще одна цель — обезуглероживание. При этом снаружи имеется полностью обезуглероженный слой глубиной несколько миллиметров, затем содержание углерода постепенно повышается, но и в центре отливки оно не достигает исходного.

Отжиг белого чугуна на черносердечный ферритный чугун состоит из пяти этапов (рис. 80).

1. Нагрев чугуна с исходной структурой перлит + цементит до 900—1000 °С.

2. Выдержка при 900—1000 °С (первая стадия графитизации), во время которой происходит разложение структурно свободного цементита и насыщение аустенита углеродом до содержания, близкого к равновесному. В конце этого периода структура чугуна — аустенит + углерод отжига.

3. Охлаждение до температуры ниже эвтектоидной (690—700 °С), при которой часть углерода выделяется из твердого раствора, и происходит перлитное превращение. К концу этого периода структура чугуна — перлит + углерод отжига.

4. Выдержка при 690—700 °С (вторая стадия графитизации), во время которой происходит разложение эвтектоидного цементита. К концу выдержки структура чугуна — феррит + углерод отжига.

5. Охлаждение на воздухе.

Продолжительность выдержки при первой и второй стадиях графитизации зависит от скорости разложения цементита. Общий цикл отжига обычно составляет 50—60 ч.

При отжиге на черносердечный перлитный чугун исключается вторая стадия графитизации, относительно быстрое охлаждение в интервале критических температур позволяет зафиксировать перлитную металлическую основу. При отжиге на белосердечный ковкий чугун в интервале высоких температур идут параллельно два процесса — графитизация и обезуглероживание. Обезуглероживание обеспечивают отжигом отливок в контейнерах, которые после укладки отливок засыпают рудой. Процесс обезуглероживания идет через газовую фазу, передающую кислород от руды к углероду отливки. Углерод окисляется в основном

Массовая долл, %, химических элементов в ковком чугуне

Ковкий чугун	C	Si	Mn	S
Черносердечный ферритный	2,2—2,9	1,4—0,8	0,3—0,5	0,05—0,15
Черносердечный перлитный	2,2—2,9	1,4—0,8	0,3—1	0,05—0,15
Белосердечный	2,8—3,2	1,1—0,7	0,4—0,7	0,12—0,2

Примечания: 1. В белосердечном чугуне содержание углерода указано до отжига. 2. Содержание фосфора не более 0,2.

на поверхности отливки. Содержание углерода по сечению отливки уменьшается за счет диффузии углерода твердого раствора от центра к периферии.

При проведении обезуглероживания режим отжига белосердечного чугуна (рис. 80, б) отличается от режима отжига черносердечного чугуна высокой температурой (1000—1050 °С) и большей продолжительностью цикла (100—110 ч).

Повышенный расход топлива, связанный с длительным циклом отжига, и расход руды делают этот способ менее экономичным, чем способ получения черносердечного чугуна. Поэтому на отечественных заводах производят в основном отливки из черносердечного ковкого чугуна.

При отжиге на белосердечный чугун отливки укладывают в чугунные контейнеры (горшки) и пересыпают песком. Термические печи для отжига по характеру работы разделяют на непрерывные и периодические. В непрерывных печах туннельного типа длиной до 100 м и производительностью до 100 т отливок в сутки перемещаются тележки с контейнерами, нагруженными отливками. Печи имеют различные температурные зоны. В зависимости от требуемого режима отжига устанавливают температуру и длину каждой зоны, скорость перемещения тележки.

Для отжига чугуна на черносердечный получили распространение электрические печи элеваторного типа. Отливки загружают на вагонетку, которая поднимается плунжером и вводится в печь для прохождения первой и второй стадии графитизации. Так как атмосфера в печи нейтральная, отливки загружают в вагонетку без контейнеров и паковочного материала. Цикл отжига сокращается до 30—40 ч.

Химический состав чугуна (табл. 16) зависит от требуемых механических свойств, толщины стенок отливки, типа плавильного агрегата, способа отжига и т. д. Содержание углерода и кремния в зависимости от толщины стенок и массы отливки выбирают таким, чтобы до отжига чугун имел белую структуру. При этом учитывают влияние элементов на продолжительность отжига и механические свойства чугуна.

Механические свойства ковкого чугуна определяются общим содержанием в нем включений углерода отжига, поэтому для получения чугуна высших марок необходимо использовать низкоуглеродистый чугун (2,6—2,7 % С). Повышение содержания кремния уменьшает продолжительность первой и второй стадий графитизации, поэтому, принимая за основу содержание углерода, требуемое для получения чугуна заданной марки, назначают максимально допустимое содержание кремния, обеспечивающее структуру белого чугуна. Повышенное содержание марганца в перлитном чугуне замедляет графитизацию при эвтектоидном превращении и способствует получению сфероидального перлита и высоких механических свойств. Для повышения пластических свойств содержание фосфора должно быть снижено.

При производстве ферритного ковкого чугуна содержание хрома ограничивается 0,07 % вследствие его тормозящего влияния на графитизацию, особенно во второй стадии.

Широко применяют модифицирование чугуна алюминием (0,007—0,015 %), титаном (0,01—0,05 %), висмутом (до 0,003 %), теллуром (до 0,01 %), что сокращает цикл отжига и при некоторых условиях повышает механические свойства.

Для ускорения цикла отжига возможно также использование предварительной закалки или низкотемпературной обработки отливок при 300—450 °С в течение 3—5 ч, повышение температуры выдержки отливок на первой стадии до 1050 °С, повышение содержания кремния в чугуне.

§ 6. ОТЛИВКИ ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО ЧУГУНА

Высокопрочный чугун в литом состоянии получают при введении в жидкий металл таких элементов-модификаторов, как Mg, Ce, Y, Ca и др. Наибольшее практическое применение получил Mg. При его содержании в чугуне 0,03—0,05 % графит кристаллизуется в виде шаровидных включений (глобулей).

В определенных случаях для сфероидизации графита применяют редкоземельные металлы (РЗМ), например в виде добавок ферроцерия или Fe—Si — РЗМ-лигатур (25—40 % РЗМ). Эти лигатуры характеризуются простотой ввода в чугун, но вместе с тем высокой стоимостью и необходимостью иметь низкое содержание серы в исходном чугуне.

Получение шаровидной формы графита в высокопрочном чугуне практически не ограничивается толщиной стенки и массой отливки. Высокопрочный чугун широко применяют для деталей металлургического оборудования, коленчатых валов различных двигателей, деталей сельскохозяйственных машин и т. д.

В настоящее время доказана возможность и экономическая целесообразность замены ряда деталей, получаемых из стальных литых и кованных заготовок, чугунными отливками с шаровидным графитом (табл. 17).

Механические свойства высокопрочного чугуна с шаровидным графитом (ГОСТ 7293—79)

Марка чугуна	Временное сопротивление	Предел текучести	Относительное удлинение, %	Твердость НВ
	МПа, не менее			
ВЧ 42-1	412	274	12	140—200
ВЧ 60-2	588	393	2	200—280
ВЧ 80-2	784	490	2	250—330
ВЧ 120-2	1177	882	2	302—380

Чугуны марок ВЧ 50-2, ВЧ 60-2 с преобладанием перлита в структуре металлической основы можно получать как в литом состоянии, так и в результате термической обработки. Цель термической обработки — разложение структурно свободного цементита в относительно тонких сечениях отливки (графитизирующий отжиг) или упрочнение перлитной матрицы (нормализация). Может быть использована комбинированная термическая обработка, преследующая разложение структурно свободного цементита с последующей нормализацией (графитизирующей нормализацией).

Чугуны ВЧ 38-17, ВЧ 42-12, ВЧ 45-5 с преобладанием феррита в структуре металлической основы получают графитизирующим отжигом для разложения структурно свободного и эвтектоидного цементита.

В отличие от чугуна с пластинчатым графитом, механические свойства чугуна с шаровидным графитом в большей степени определяются металлической основой и в меньшей — количеством, размерами и распределением графитовых включений. Поэтому ряд режимов термической обработки, используемых для повышения механических свойств стали, оказывается эффективным также и для высокопрочного чугуна. В производственных условиях получают перлитные чугуны с пределом прочности до 1177 МПа и ферритные чугуны с относительным удлинением до 17 %.

Основной операцией технологического процесса получения высокопрочного чугуна является введение магния в жидкий чугун. Магний — легкий металл, плотность которого $1,738 \cdot 10^{-3}$ кг/м³; температуры плавления и кипения соответственно 651 °С и 1107 °С. На воздухе магний легко воспламеняется. Введение чистого магния в жидкий чугун при атмосферном давлении сопровождается интенсивным выделением дыма, выплесками металла и пироэффектом, что вызывает необходимость проведения специальных мероприятий и использования специального оборудования, обеспечивающих высокую производительность, хорошее усвоение магния в расплаве и безопасность труда работающих. Существующие способы введения магния в чугун можно разделить на две группы: введение при повышенном давлении; введение при атмосферном давлении.

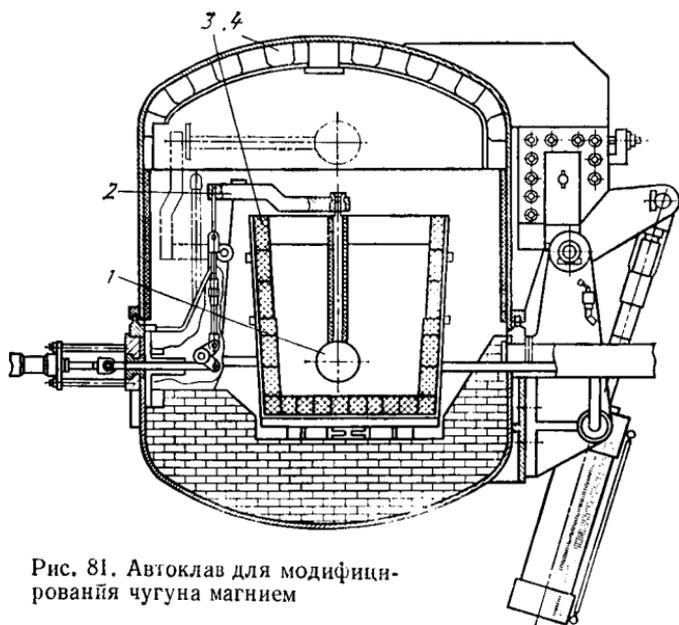


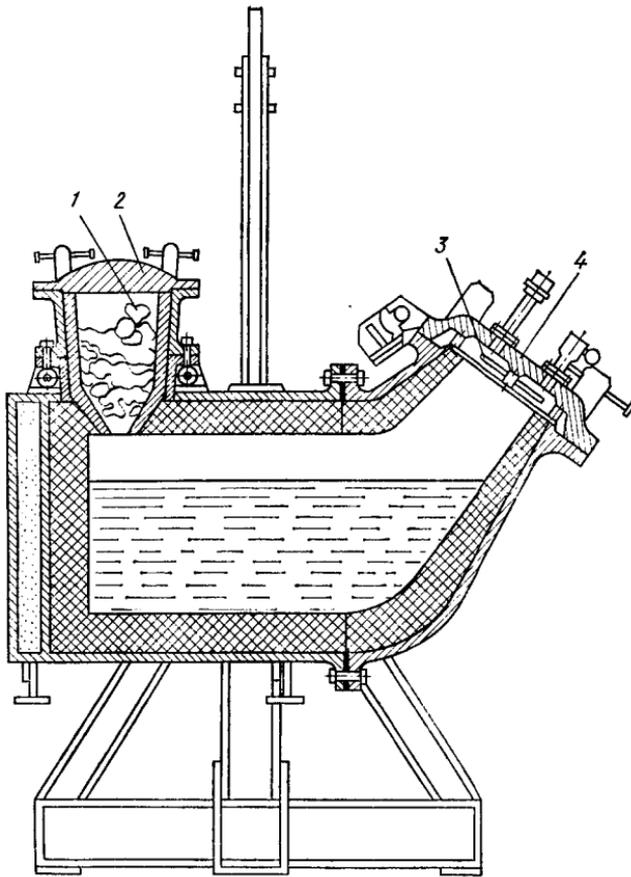
Рис. 81. Автоклав для модифицирования чугуна магнием

Первая группа способов основана на том, что металлический магний в чистом виде вводится в жидкий чугун, находящийся под повышенным давлением. Как известно, при увеличении давления температура кипения веществ повышается. Температура кипения магния повышается от 1107°C (при атмосферном давлении) до 1350°C (при $0,6\text{ МПа}$). В ковше чугун перегрет обычно до $1300\text{—}1350^{\circ}\text{C}$, и примерно до этой же температуры нагревают магний. Следовательно, если давление над поверхностью жидкого металла $0,5\text{—}0,6\text{ МПа}$, то магний будет растворяться в чугуне.

В камере (рис. 81) для модифицирования чугуна магнием (автоклаве) под давлением в ковшах емкостью до 15 т процесс проводится следующим образом. К рычагу 2 крепят контейнер 1 с заданной дозой магния. Устанавливают ковш 3 с чугуном и закрывают крышкой 4 камеру. Открывают вентиль в сети сжатого воздуха и давление в камере доводят до $0,6\text{ МПа}$, после чего в ковш вводят контейнер с магнием. Растворение магния продолжается $6\text{—}10$ мин. Всеми операциями управляют с пульта. Привод всех механизмов электрогидравлический.

Для ввода магния в чугун, находящийся под давлением, используют также специальные герметизированные ковши барабанного или конвертерного типа (рис. 82). Операция идет в такой последовательности. В зарядную камеру 1 закладывают необходимое количество магния и камеру закрывают крышкой 2. При положении ковша, показанном на рис. 82, он заполняется чугуном, крышка 3 закрывается и прижимается к ковшу затворами 4. Ковш поворачивается против часовой стрелки на 90° . Зарядная камера

Рис. 82. Герметизированный ковш конвертерного типа емкостью 10 т



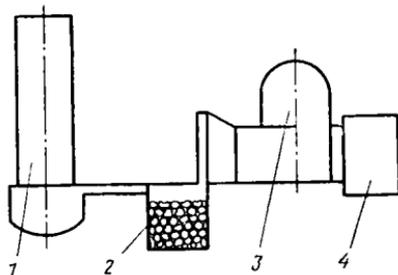
с магнием оказывается под металлом. Магний нагревается до температуры кипения, и пары магния создают повышенное давление в пространстве над уровнем металла. Когда давление достигнет 0,3—0,5 МПа, кипение полностью прекращается, и оставшаяся часть магния растворяется. Продолжительность операции в ковше емкостью 10 т 3—4 мин.

При использовании способов второй группы магний в составе лигатур или в виде механических смесей (брикеты Mg—FeSi, кокс, пропитанный магнием, и др.) вводится в жидкий чугун при заполнении ковша или формы. Наиболее часто используют Ni—Mg—Ce-лигатуры (15 % Mg, 5 % Ce) и Fe—Si—Mg-лигатуры (50—60 % Si, 3—10 % Mg), большинство из которых содержит немного Ca, Ce, Ba и другие элементы, обеспечивающие рафинирование и десульфурацию металла.

Тяжелые Ni—Mg-лигатуры, плотность которых больше плотности жидкого чугуна, можно закладывать в ковш в виде кусков перед его заполнением металлом. Для обработки чугуна легкими лигатурами на основе кремния наибольшее распространение

Рис. 83. Литниковая система при модифицировании чугуна в литейной форме:

1 — стояк; 2 — реакционная камера с модификатором; 3 — шлакоулавливающая боышка; 4 — отливка



нашел «сэндвич — процесс», при котором лигатура загружается в специальную полость, образованную в футеровке днища ковша, и прикрывается стальной высежкой. Другим способом, обеспечи-

вающим меньший расход лигатуры, является заливка чугуна в ковш с лигатурой, помещенной в кармане, образованном разделением дна ковша перегородкой на две неравные части. Сверху лигатура прикрывается слоем дробленого карбида кальция. Если ковш закрыть специальной сменной крышкой, то обработка металла будет происходить без пирозффекта, дымовыделения и выбросов расплава даже при использовании лигатур с повышенным содержанием магния.

Улучшить растворение магниевых лигатур можно перемешиванием расплава в ковше механическим способом или продувкой инертным газом.

Весьма эффективным методом, обеспечивающим максимальное усвоение магния при минимальном расходе лигатуры, является модифицирование чугуна непосредственно в полости литейной формы (рис. 83). Мелкодробленую лигатуру помещают в специальную реакционную камеру литниковой системы. При применении этого метода необходимо обеспечить правильный расчет элементов литниковой системы, однородность состава лигатуры и низкое содержание серы в базовом чугуне.

Обрабатывать чугун магнием непосредственно в процессе заливки формы можно также путем дозированного введения в струю жидкого металла у литниковой чаши проволоки, содержащей прессованный порошок из сплава Fe—Si—Mg. Устройство для подачи проволоки в зону контакта с расплавом обеспечивает автоматическое регулирование количества растворенной лигатуры в зависимости от скорости заливки.

При сравнительной оценке различных способов введения магния в чугун наиболее важно учесть максимальный коэффициент усвоения модификатора $\eta = (Mg_{у\text{св}}/Mg_{\text{мод}}) \cdot 100\%$, где $Mg_{\text{мод}}$ — введенный магний; $Mg_{у\text{св}}$ — магний, усвоенный чугуном. Преимущество имеют способы введения магния под давлением, обеспечивающие возрастание коэффициента усвоения в 2—3 раза.

Часть усвоенного чугуном магния, взаимодействуя с серой, кислородом и азотом чугуна, образует устойчивые и не растворяющиеся в чугуне соединения: сульфиды (MgS), оксиды (MgO), нитриды (Mg₃N₂); остальная часть усвоенного магния растворяется в чугуне (Mg_{гост}): $Mg_{у\text{св}} = Mg_{\text{гост}} + Mg_{\text{сульф}} + Mg_{\text{окис}} + Mg_{\text{нитр}}$. С учетом коэффициента усвоения количество магния, которое должно быть введено с модификатором,

$$Mg_{\text{мод}} = (Mg_{\text{гост}} + Mg_{\text{сульф}} + Mg_{\text{окис}} + Mg_{\text{нитр}})/\eta.$$

Формулу можно упростить, если пренебречь значениями $Mg_{окис}$ и $Mg_{нитр}$ как очень малыми и если учесть, что минимальное количество магния, при котором проявляется его модифицирующее действие, 0,04 % ($Mg_{ост} = 0,04$ %):

$$Mg_{мод} = [0,04 + 0,76 (S_{исх} - 0,02)]/\eta,$$

где 0,76 — соотношение атомных масс Mg и S; $S_{исх}$ — содержание серы в чугуне до его модифицирования; 0,02—содержание серы после модифицирования чугуна.

Магний является карбидообразующим элементом, и для предотвращения отбела после сфероидизирующей обработки проводят вторичное графитизирующее модифицирование в ковше или форме. Количество модификатора обычно составляет 0,3—1 % в зависимости от химического состава чугуна и толщины стенки отливки. Такое модифицирование не проводят, если отливки подвергаются графитизирующему отжигу.

Учитывая, что шаровидный графит не оказывает такого сильного влияния на механические свойства, как пластинчатый, содержание углерода обычно поддерживается на достаточно высоком уровне (3,2—3,8 %), что повышает литейные свойства чугуна и снижает его склонность к отбелу.

Содержание кремния 2—3 % выбирают с целью предотвращения отбела, а также для регулирования структуры металлической матрицы. Вследствие отрицательного влияния кремния на ударную вязкость и для снижения порога хладноломкости рекомендуется, чтобы его содержание не превышало 2,1—2,4 %. В чугунах с ферритной матрицей по этой же причине содержание марганца и фосфора должно быть возможно низким.

Низкий уровень серы в базовом чугуне (менее 0,02 %) является одним из основных условий эффективности сфероидизирующей обработки. Высокое содержание серы обуславливает увеличенный расход модификатора и приводит к снижению механических свойств чугуна вследствие образования неметаллических включений. При повышенном содержании серы в чугуне перед введением магния необходимо проводить внепечную десульфурацию.

Высокопрочный чугун используют и как материал со специальными свойствами. Применение его для изложниц мелких и средних стальных слитков позволяет повысить их стойкость в 2—2,5 раза по сравнению с изложницами из обычного серого чугуна.

Весьма перспективным является использование высокопрочного чугуна с аустенитной структурой. В основном изучены высоколегированные чугуны (Ni—Cr—Cu), аналогичные чугуну «нирзист». По коррозионной стойкости, жаростойкости и ростоустойчивости чугуны с шаровидным графитом превосходят аустенитные чугуны с пластинчатым графитом.

§ 7. ОТЛИВКИ ИЗ ЧУГУНА С ВЕРМИКУЛЯРНЫМ ГРАФИТОМ

Чугун с вермикулярным графитом занимает промежуточное положение между чугунами с пластинчатым и шаровидным графитом и в силу этого сочетает хорошие литейные свойства с до-

Механические свойства чугунов с вермикулярным графитом

Металлическая основа	Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость НВ	Ударная вязкость при 20 °С, Дж/см ²
Ферритная	320—360	4—7	130—160	6—8
Ферритно-перлитная	360—420	2—5	170—230	4—7
Перлитная	420—550	0,5—2,5	240—285	2—4

Примечание. Модуль упругости чугунов 14·10⁴ МПа.

статочны высокими прочностью, пластичностью и ударной вязкостью (табл. 18).

Теплопроводность чугуна с вермикулярным графитом (49—51) 10² Вт/(м·°С) значительно выше, чем теплопроводность чугуна с шаровидным графитом (0,29—0,33) 10² Вт/(м·°С) и лишь немного ниже, чем у серого чугуна (50—55) 10² Вт/(м·°С). Другой характерной особенностью этого сплава является значительно меньшая, чем у серого чугуна, чувствительность механических свойств к изменению скорости охлаждения.

Такие высокие показатели механических свойств и теплопроводности в сочетании с хорошими литейными свойствами позволяют использовать чугун с вермикулярным графитом для крупных отливок сложной конфигурации. В последние годы расширяется применение этого сплава в автомобильной и судостроительной промышленности, особенно для ответственных деталей дизелей, работающих в условиях динамических и термоциклических нагрузок (блоков и головок цилиндров, тормозных дисков и др.).

Для получения в структуре вермикулярного графита чугун подвергается обработке сфероидизирующими присадками, как и высокопрочный чугун, но в меньшем количестве. Однако узкий интервал эффективного остаточного содержания Mg или Ce и необходимость строгого контроля содержания S в базовом чугуне и температуры обработки расплава затрудняют получение этого сплава в промышленных условиях. Небольшие отклонения оптимального соотношения S и Mg вызывают получение в структуре либо пластинчатого, либо шаровидного графита.

Существует два основных способа получения данного чугуна, обеспечивающих достаточно стабильные результаты. Первый способ состоит в обработке расплава РЗМ (Ce, Y и др.) в виде многокомпонентных лигатур из расчета получения остаточного содержания РЗМ в пределах 0,1—0,15 %, в том числе 0,02—0,06 % Ce. Количество лигатуры тем больше, чем выше содержание серы в базовом чугуне. После обработки лигатурой требуется дополнительное вторичное графитизирующее модифицирование для предотвращения отбела.

При втором способе в чугун вводят легатуру, содержащую одновременно глобуляризирующие (Mg, Ce) и деглобуляризирующие (Ti, Al) элементы, а также кальций. Например, можно использовать легатуру следующего состава, %: 48—52 Si, 4—5 Mg, 8—10 Ti, 0,02—0,04 Ce, 4—6 Ca, 1—2 Al, остальное Fe.

§ 8. ОТЛИВКИ ИЗ БЕЛОГО И ОТБЕЛЕННОГО ЧУГУНОВ

Белый чугун широко применяют для изготовления деталей дробильного оборудования (брони шаровых мельниц, мелющих шаров), деталей шламовых насосов, лопастей шнеков, лопаток дробеметных турбин и т. д. Нелегированный белый чугун обладает повышенной хрупкостью и при обычных режимах не поддается обработке резанием. Отливки, имеющие белый излом по всему сечению, применяют в случаях, когда детали не требуют механической обработки и не подвергаются в процессе эксплуатации ударным нагрузкам.

Детали, работающие в условиях усиленного износа и повышенных нагрузок, например прокатные валки, крановые, рудничные и конвейерные колеса, изготавливают из чугуна с поверхностным отбелом. Макроструктура отливок состоит из наружного слоя белого чугуна, обеспечивающего высокое сопротивление износу, и сердцевины из серого чугуна, обеспечивающего вязкость и прочность отливки.

Повышение содержания углерода в белом чугуне в связи с изменением количества и формы цементита способствует повышению твердости, а следовательно, износостойкости, но при этом снижаются прочность и пластичность.

В особо жестких условиях эксплуатации для повышения абразивной стойкости применяют легированные белые чугуны, в основном хромоникелевый чугун «нихард», содержащий до 5 % Ni и до 2,5 % Cr. Такой чугун обладает высокой твердостью и прочностью благодаря мартенситной структуре. Регулируя содержание углерода, можно получить чугуны повышенной прочности или повышенной твердости.

Отливки с наружным отбеленным слоем получают в результате ускорения охлаждения наружных слоев металла с помощью холодильников (кокилей). Изменяя интенсивность охлаждения и химический состав чугуна, можно получать отливки с различной глубиной зоны чистого отбела и переходной зоны, а также регулировать твердость отбеленного слоя. По уменьшению влияния на твердость отбеленного слоя элементы можно расположить в ряд C, Ni, P, Mn, Cr, Mo, V, Si, Cu, Ti.

Между влиянием элементов на отбеливаемость и твердость белого чугуна нет связи, как это имеет место в сером чугуне. Углерод, наиболее сильно влияющий на твердость белого чугуна, в то же время является графитизирующим элементом и уменьшает отбел. Большое влияние на глубину отбела и твердость оказывает интен-

сивность охлаждения наружного слоя, которую регулируют изменением толщины холодильника, нанесением теплоизолирующих покрытий или повышением температуры холодильника.

§ 9. ПРИГОТОВЛЕНИЕ ЧУГУНА

Шихтовые материалы. Особенности процесса приготовления жидкого чугуна (применяемые шихтовые материалы и методы плавки) в значительной степени определяют свойства чугуна отливки.

В настоящее время до 90 % всего чугуна выплавляется в вагранках. Непрерывно возрастающие требования к свойствам чугунов, соединение новых марок модифицированных и легированных чугунов вызывают необходимость широкого внедрения плавки в электропечах, главным образом в индукционных печах промышленной частоты. Одновременно совершенствуется процесс ваграночной плавки с целью получения высококачественного чугуна при минимальных затратах.

Составляющими металлической шихты являются литейный и передельный чушковые чугуны, ферросплавы, собственные отходы производства (литники, брак), чугунный лом со стороны, стальной лом.

Состав литейных коксовых чушковых чугунов регламентирован ГОСТ 4832—80. Основным классификационным признаком является содержание кремния в диапазоне от 3,2—3,6 % до 1,2—1,6 %, в соответствии с которым чугуны делятся на шесть марок. В зависимости от содержания других элементов чушковые чугуны делят на группы (по марганцу от 0,05 до 1,5 %), классы (по фосфору от 0,03 до 1,2 %) и категории (по сере от 0,02 до 0,05 %). Для удобства шихтовки масса одной чушки не должна превышать 25 кг.

При ваграночной плавке возможно использование и передельных доменных чугунов, отличающихся низким содержанием кремния (не более 1,3 %). При замене литейных чугунов в шихте передельными отмечается некоторое улучшение механических свойств, повышение жидкотекучести и склонности к отбелу выплавляемого серого чугуна. Однако применение передельных чугунов предопределяет существенное увеличение ферросилиция в металлозавалке и необходимость его точного дозирования.

Для выплавки чугунов, легированных хромом и никелем, используется природнолегированный чушковый чугун, выплавляемый из орско-халиловских руд. Этот чугун содержит 2,1—3,7 % Cr и до 0,6 % Ni.

Для регулирования содержания кремния и марганца в выплавляемом чугуне в шихту добавляют ферросплавы: ферросилиций, содержащий 20—75 % Si (ФС20Л, ФС45 и ФС75Л), и ферромарганец, содержащий 70—85 % Mn.

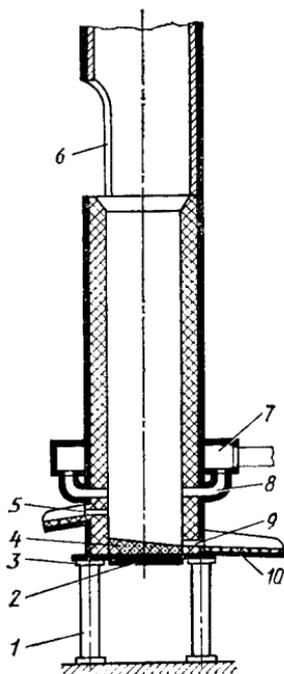


Рис. 84. Вагранка

Значительную часть шихты составляют вторичные черные металлы: собственные отходы производства, стружка, а также чугунный и стальной лом со стороны. Существующие стандарты и технические условия предусматривают подразделение лома на группы в зависимости от химического состава (легированный и нелегированный). Установлены допустимые размеры кусков и их масса. Их максимальный размер не должен превышать $1/3$ диаметра шихты вагранки.

В литейном цехе, как правило, проводят дополнительную сортировку и выборочный химический анализ лома и возврата, чтобы обеспечить минимальный разброс показателей химического состава каждой партии вторичных черных металлов, применяемых для шихтовки.

Топливом для вагранки служит в основном каменноугольный литейный кокс, классифицируемый согласно ГОСТ 3340—71 на три сорта, отличающихся предельным содержанием серы (от 0,6 до 1,4 %) и зольностью (от 11 до 12 %). Содержание

влаги должно составлять не более 5 %, выход летучих веществ — не более 1,2 %, минимальный размер кусков — 40 мм.

Литейный кокс отличается от металлургического доменного большей плотностью (пористость не выше 42 %) и, следовательно, более низкой реакционной способностью. В качестве флюса преимущественно используют известняк, содержащий не менее 50 % CaO и не более 3 % ($\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$).

Плавка чугуна в вагранке. Вагранка представляет собой шахтную печь непрерывного действия, работающую по принципу противотока, в которой металл соприкасается с твердым топливом и продуктами его горения. Металлическая шихта, опускаясь вниз, нагревается и плавится за счет теплоты поднимающихся газов и затем перегревается при дальнейшем контакте с раскаленным коксом. Из всех топливных печей вагранки имеют наибольший тепловой коэффициент полезного действия (КПД), достигающий 35—45 %.

Вагранка (без трубы и искроуловителя) показана на рис. 84. Цилиндрический кожух вагранки опирается на подовую плиту 3 и колонны 1. В подовой плите имеется отверстие, которое во время плавки закрыто крышкой 2. По окончании плавки крышка открывается, и через отверстие удаляются остатки кокса, шлак и др. Кожух изнутри футеруют, как правило, шамотным кирпичом или шамотной набивной массой. После футеровки стенок и закрытия

крышки 2 специальной массой набивают под 4, имеющий уклон к лётке 9 для выпуска жидкого чугуна.

Воздух для горения кокса подается от воздуходувки в фурменный коллектор 7. Давление воздуха в среднем $(0,5-1) \cdot 10^4$ Па. Из фурменной коробки воздух направляется в фурмы 8, расположенные на определенном расстоянии от пода. Пространство от уровня фурм до подины называют горном. В верхней части горна имеется лётка 5 для выпуска шлака. При отсутствии копильника жидкий чугун через лётку 9 по желобу 10 периодически выпускается в разливочные ковши. Над уровнем фурм находится шахта вагранки. Через окно 6 загружают шихтовые материалы, топливо и флюсы.

Продолжением шахты является труба вагранки, заканчивающаяся расширяющейся частью — искроуловителем, назначение которого состоит в улавливании мельчайших твердых частиц, уносимых отходящими газами. В вагранках закрытого типа отходящие газы отсасываются из шахты через отверстие, расположенное выше уровня загрузочного окна, и поступают в систему газоочистки.

Длительность плавильной кампании вагранки в небольших цехах мелкосерийного производства определяется организацией работы в формовочно-сборочном отделении. Обычно она не превышает 16—20 ч. В плавильном отделении устанавливают две вагранки, работающие попеременно через день.

В цехах серийного и массового производства можно использовать вагранки с длительным циклом работы, продолжительность плавильной кампании которых составляет 1—3 недели. Эти вагранки обычно имеют нефутерованный кожух выше уровня фурм, наружное поливное охлаждение. Плавка идет практически на гарнисаже, образуемом на внутренней поверхности шахты печи.

После выбивки и охлаждения вагранку очищают от шлаковых настывлей, восстанавливают футеровку и набивают подину. В подготовленную к плавке вагранку через окно загружают первую порцию кокса. В несколько отверстий, имеющихся в нижней части горна, вставляют переносные газовые горелки и разжигают кокс. После того как весь кокс равномерно раскалится, горелки убирают, отверстия в горне заделывают огнеупорной массой; дальнейшее горение кокса идет при подаче воздуха через фурмы.

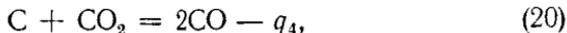
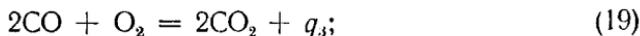
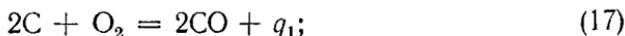
Первую порцию кокса, лежащую на подине вагранки, называют холостой колошей. Высота холостой колоши зависит от производительности вагранки и режима плавки. В большинстве случаев верхний уровень холостой колоши выше уровня фурм на 800—1200 мм.

После того как холостая колоша доведена до заданного уровня и кокс в ней раскален, начинают загрузку вагранки. Через окно попеременно загружают рабочие колоши (металлические и топливные), а также флюс. Всего в шахте помещается пять—семь

рабочих колош. Затем включают дутье, и начинается процесс плавки. За определенный отрезок времени после начала плавки теплоты, выделившейся в результате горения кокса, оказывается достаточной для подогрева, а затем и для расплавления первой металлической колоши. За это время сгорает часть кокса холостой колоши, и уровень ее понижается (обычно на 100—200 мм). Но за расплавившимся металлом находится кокс рабочей колоши, который присоединяется к коксу холостой колоши и восстанавливает ее первоначальную высоту. Плавление следующих металлических колош идет в той же последовательности. Следовательно, для поддержания постоянной высоты холостой колоши в рабочей колоше кокса должно быть столько, сколько его сгорает за время расплавления одной металлической колоши.

В результате сгорания кокса и проплавления одной металлической колоши столб шихты и топлива в шахте опускается, и через загрузочное окно загружают очередную металлическую и топливную колоши и флюсы.

Интенсивное горение кокса обеспечивает кислород воздуха, поступающий через фурмы, углерод кокса взаимодействует с образовавшимся CO_2 :



где q — количество теплоты.

На рис. 85 приведены данные, характеризующие изменение состава газовой фазы по высоте холостой колоши в околофурменной области. Эту область можно разделить на две зоны. Непосредственно над фурмами располагается кислородная зона, где проте-

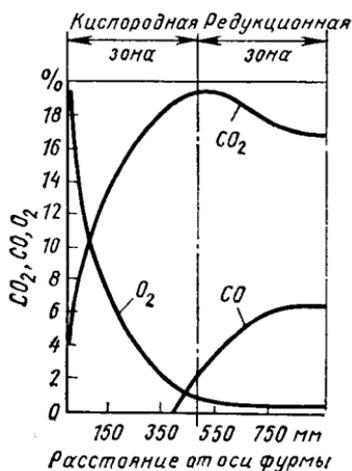


Рис. 85. Изменение состава газовой фазы в околофурменной области вагранки

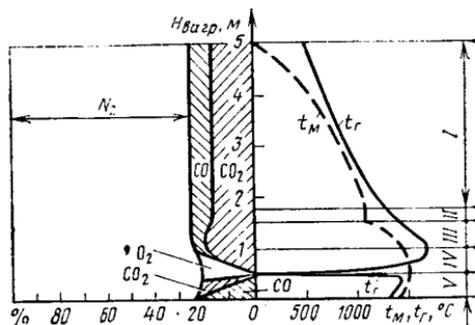


Рис. 86. Схема ваграночного процесса

кают главным образом реакции (17), (18) и (19), идущие с выделением теплоты. На верхнем уровне этой зоны кислород воздуха практически полностью израсходован, и начинается редуцирующая зона, где получает развитие реакция (20), проходящая с поглощением теплоты. Соответственно снижается содержание CO_2 . Установившееся соотношение CO_2/CO в дальнейшем при прохождении газов в шахте вагранки существенно не изменяется.

В соответствии с процессами, имеющими преимущественное развитие в отдельных областях, вагранку по высоте можно условно разделить на пять зон; I — подогрева, II — плавления, III — редуцирующую, IV — кислородную и V — горнковую (рис. 86). Рассмотрим процессы, проходящие в этих зонах.

В I зоне газы движутся навстречу шихтовым материалам и нагревают их. Температура газов изменяется примерно от 1200 до 400 °С. Топливо, нагреваясь до 100 °С, теряет содержащуюся в нем влагу, а при нагреве до более высоких температур — и летучие вещества. Известняк, загружаемый в качестве флюса, полностью диссоциирует: $\text{CaCO}_3 = \text{CaO} + \text{CO}_2$.

Во II зоне металл, нагретый до температуры плавления, полностью расплавляется. Температура металла при этом остается постоянной. По мере сгорания кокса и снижения верхнего уровня холостой колоши зона плавления перемещается соответственно вниз. К моменту начала плавления следующей металлической колоши верхний уровень холостой колоши вновь возвращается в исходное положение за счет кокса рабочей колоши. В течение всего периода плавления куски металла омываются газами, не содержащими свободного кислорода. Газы в этой зоне значительно охлаждаются, передавая теплоту на расплавление металла.

В III и IV зонах капли металла перегреваются вследствие излучения раскаленного кокса, а также высокой температуры газов. Чем выше эта температура и больше время нахождения капли металла в III и IV зонах, тем выше степень перегрева. Температура чугуна повышается за счет теплоты окисления примесей чугуна. В этих зонах происходит окисление компонентов сплава. Менее интенсивно оно идет в III зоне, где газовая фаза слабо окислительная, и более интенсивно в IV зоне, из-за наличия в ней свободного кислорода.

Изменение состава чугуна при плавке будет зависеть от интенсивности процессов окисления газовой фазой всех примесей, а также от процессов, происходящих при взаимодействии жидкого металла с коксом и шлаком. В этих зонах капли металла, соприкасаясь с кусками кокса, растворяют углерод и серу кокса и насыщаются этими элементами. В этих же зонах формируется жидкий шлак из флюса, золы кокса, оксидов различного состава, разрушающейся футеровки и т. д.

В V зоне, только в верхней ее части, газовая фаза окислительная. Металл и шлак в этой зоне охлаждаются вследствие потерь теплоты через стенки горна. Состав металла изменяется только за счет насыщения серой и углеродом из кокса.

Перегрев чугуна. Важное значение для получения чугуна высокого качества имеет его перегрев в период пребывания в III и IV зонах вагранки. На рис. 87 показано распределение температуры газовой фазы по высоте вагранки при разных расходах дутья, его температуры и расходах кокса. В зависимости от характера кривой распределения и средней температуры плавления $t_{\text{пл}}$ металла определяется верхний уровень области плавления и расстояние h , которое проходит капля металла в зоне высоких температур. В IV зоне вагранки изменяется также максимальная температура t_{max} . Очевидно, количество теплоты, переданное капле металла, а следовательно, перегрев металла тем больше, чем выше максимальная температура газов t_{max} и

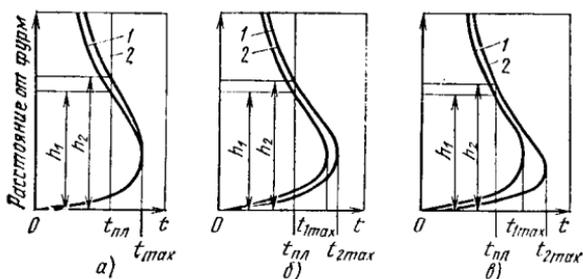


Рис. 87. Изменение температуры в вагранке над уровнем фурм в зависимости от технологических параметров плавки:

а — расход кокса 8 (1) и 12 % (2); б — расход воздуха 70 (1) и 100 м³/(м²/мин) (2); в — температура воздуха 20 (1) и 400 °С (2)

длиннее путь, пройденный каплей металла в зоне высоких температур h , а также интенсивнее подъем температур у фурм. Это можно выразить формулой $\Delta t = \alpha h t_{\max}$, где α — коэффициент, учитывающий условия теплопередачи и распределение температур.

Степень перегрева чугуна можно повысить, увеличивая расход кокса или расход воздуха, а также повышая температуру последнего (рис. 88). При увеличении расхода кокса и неизменном расходе воздуха повышается температура чугуна, но снижается производительность вагранки, так как на сгорание кокса одной рабочей колоши и проплавление одной металлической колоши требуется больше времени.

Увеличение расхода воздуха повышает производительность вагранки и до определенного предела температуру чугуна. Например, при расходе менее 7 % кокса повышение подачи дутья более 100 м³/(м²·мин) уменьшает температуру чугуна, так как за время расплавления одной металлической колоши сгорает больше кокса холодной колоши, чем имеется в рабочей топливной колоше, и зона плавления понижается.

Изменение состава чугуна. Газовая фаза в I—IV зонах, где металл нагревается, расплавляется и перегревается, является окислительной по отношению к железу и остальным

элементам чугуна. Однако конечный состав чугуна определяется не только воздействием газовой фазы, но и влиянием шлака, а также взаимодействием жидкого металла с коксом. В результате окисления железо, кремний и марганец угорают и их оксиды (FeO, SiO₂, MnO) переходят в шлак. В зависимости от дутьевого и топливного режимов плавки и определяемого ими состава газовой фазы угар кремния

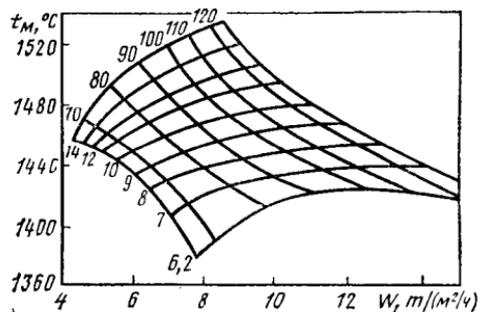


Рис. 88. Зависимость удельной производительности вагранки и температуры t_M чугуна на желобе от расхода кокса и воздуха

составляет 5—15 %, марганца — 10—20 %. Более значительный угар марганца по сравнению с угаром кремния обусловлен наличием кислых шлаков.

Фосфор окисляется до P_2O_5 , однако непрочный оксид не связывается кислыми ваграночными шлаками, полностью восстанавливается, и весь фосфор вновь переходит в металл. Таким образом, при обычных условиях плавки концентрация фосфора не изменяется.

Наиболее сложно регулировать содержание углерода в выплавляемом металле. Во всех зонах, где металл находится в жидком состоянии, одновременно происходят два процесса: окисление углерода в металле газовой фазой и науглероживание металла за счет углерода кокса. В нижней части горна, где газовая фаза восстановительная, происходит только последний процесс. Особое значение приобретает процесс науглероживания при использовании в составе шихты стального лома. Цель увеличения содержания стали в шихте — снижение содержания углерода в выплавленном металле. Но при этом повышается степень науглероживания.

Таким образом, конечное содержание углерода в выплавленном чугуна зависит от ряда факторов. Важнейшими из них являются содержание стали в шихте, окислительная способность газовой фазы и продолжительность нахождения жидкого чугуна в горне вагранки; также оказывают влияние факторы, определяющие интенсивность науглероживания углеродом кокса, т. е. температура в III и IV зонах, размер кусков кокса, содержание в нем золы и пр.

На практике для данных условий плавки экспериментально определяют коэффициенты, характеризующие изменение содержания углерода при проплавлении шихт различного состава.

Содержание серы в чугуна при обычных методах плавки на кислых шлаках повышается главным образом за счет насыщения кокса серой. Поэтому, чем выше содержание серы в коксе и больше его расход, тем выше концентрация серы в выплавленном чугуна при прочих равных условиях. Обычно содержание серы увеличивается на 50—150 % по сравнению с исходным. При необходимости получения чугуна с низким содержанием серы применяют специальные методы плавки в вагранке на основных шлаках.

Ш л а к и. Процесс плавления чугуна сопровождается образованием шлаков. Источниками шлакообразования являются оплавленная футеровка, зола кокса, различные оксиды, внесенные шихтой (окалина, песок и т. д.), продукты окисления компонентов чугуна при плавке (FeO , SiO_2 , MnO и др.), флюс. Для регулирования состава шлака, обладающего минимальной температурой плавления и минимальной вязкостью, чаще всего используют известняк. При обычной футеровке шамотным ($Al_2O_3 + TiO_2 > 30\%$) или полукислым ($Al_2O_3 + TiO_2 > 20\%$) кирпичом получают кислые шлаки с основностью $CaO/SiO_2 = 0,5 \div 0,6$, содержащие 40—50 % SiO_2 , 18—25 % CaO , 9—18 % Al_2O_3 , 4—8 % FeO , 2—5 % MnO , 1—4 % MgO и 0,05—0,1 % S.

При основной ваграночной плавке футеровку делают из магнезита, хромомагнезита или доломита, за счет введения повышенного количества известняка

получают шлак с основностью $\text{CaO/SiO}_2 = 1,5 \div 2$, содержащей 25—30 % SiO_2 , 42—50 % CaO , 6—8 % Al_2O_3 , 0,5—1 % FeO , 0,7—1,5 % MnO , 12—15 % MgO и 0,9—1,1 % S

При наличии свободного CaO в основном шлаке проходит реакция обессеривания: $\text{FeS} + \text{CaO} = \text{CaS} + \text{FeO}$. Нерастворимое в металле соединение CaS переходит в шлак. Эффективности процесса обессеривания способствуют повышение основности шлака, снижение содержания FeO в шлаке и повышение перегрева. Основной ваграночный процесс позволяет не только предотвращать насыщение металла серой из кокса, но и выплавлять чугун с содержанием серы ниже исходного. При плавке на основных шлаках указанного состава дефосфорации не происходит, так как для удаления фосфора высокоосновный шлак должен содержать еще 20—30 % FeO , и плавка должна проводиться при возможно низких температурах.

Интенсификация плавильного процесса. Наиболее эффективным и широко распространенным методом интенсификации плавки в вагранках является использование горячего дутья, которое обеспечивает повышение температуры чугуна и снижение расхода кокса.

При неизменном расходе кокса можно обеспечить повышение температуры перегрева чугуна примерно на $\sim 70^\circ\text{C}$ (рис. 89). При сохранении той же температуры чугуна расход кокса можно снизить на $\sim 30\%$. Возможна реализация промежуточного варианта, при котором имеет место экономия кокса при одновременном повышении температуры чугуна.

На рис. 90, а приведена схема вагранки, где осуществляется подогрев дутья до 500°C в конвекционно-радиационном рекуператоре 1, конструкция которого позволяет при необходимости кроме теплоты отходящих газов использовать внешний источник подогрева. Сжигаемые в рекуператоре газы предварительно очищаются в газоочистителе 2, содержание пыли в них 50—100 мг/м^3 . В систему газоочистки входит охладитель газов 3, дезинтегратор мокрой очистки 4, который одновременно создает необходимое разрежение, и осушитель 5. Подогретый воздух из рекуператора поступает в фурменный коллектор вагранки 6.

Основной плавильного комплекса является вагранка закрытого типа с нефутерованным кожухом (рис. 90, б). Конический стальной кожух печи 1, не имеющий футеровки от загрузочного окна до фурм, обеспечивает свободный сход шихты, а также интенсивное охлаждение водой. В верхней части печи находится футерованная кольцевая камера 2 газоотсоса, соединенная с системой очистки. Уровень завалки в шихте контролируется изотопным уровнемером 3. Во время розжига холостой колоши и в период простоя горячей порожней вагранки, например в выходные дни, печь закрывается крышкой 4. Горн 5 каналом 7, расположенным на уровне пода 8, соединяется с двумя компрессионными сифонами 9, находящимися под давлением ваграночных газов. Чугун и шлак непрерывно выпускаются через один из сифонов, что значительно уменьшает износ футеровки горна. Горячее дутье подается через водоохлаждаемые медные фурмы 6, вдвинутые в зону горна. Многослойная футеровка горна выполняется из кислых и

Рис. 89. Зависимость температуры чугуна на желобе от расхода кокса и температуры дутья, °С:

1 — 500; 2 — 20

полуокислых огнеупорных масс путем торкретирования или набивки. Такая конструкция печи позволяет увеличить продолжительность плавильной кампании без выбивки до 2—3 недель, довести долю стального скрапа в шихте до 60 %, а также обеспечить высокий перегрев чугуна (1500—1560 °С).

На практике используют и другие методы, обеспечивающие увеличение производительности, снижение расхода кокса и повышение температуры чугуна. Это обогащение дутья 1—4 % кислорода и применение двух рядов фурм с контролируемым разделением дутья между фурменными коллекторами. Для экономии дефицитного кокса используют коксогазовые вагранки, где наряду с фурмами установлены газовые горелки.

Повышение требований к чистоте газов, выпускаемых в атмосферу, предопределяет необходимость оборудования вагранок эффективными установками газоочистки. Наибольшее распространение получила предварительная и тонкая очистки в барботажных

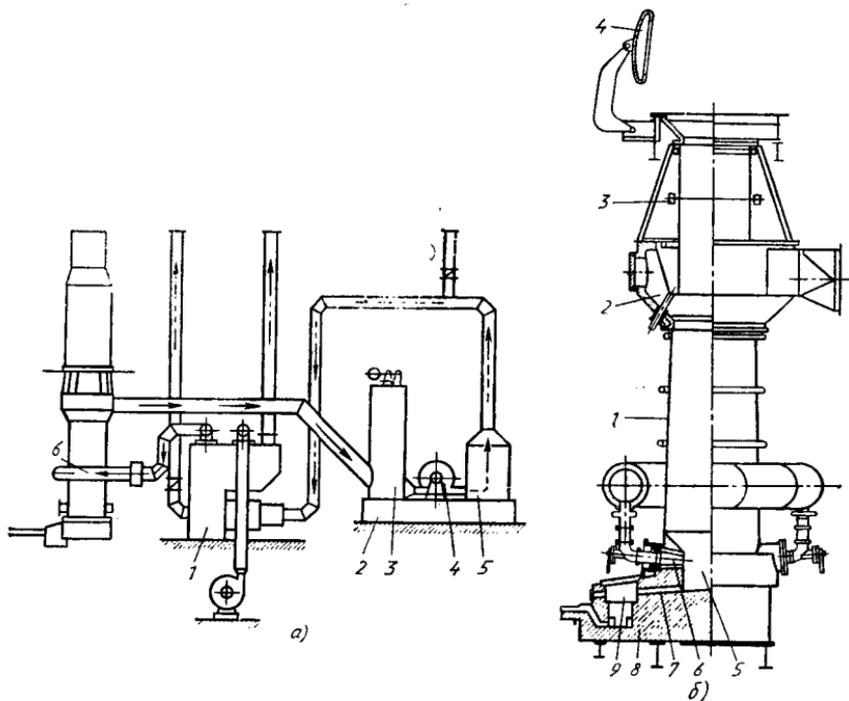
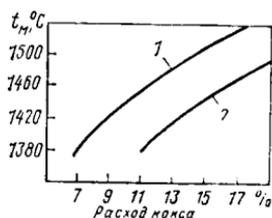


Рис. 90. Вагранки:

а — установкой для очистки газов и рекуператором; б — закрытого типа (← — — отходящие газы; ← — — газы после очистки; ← — — горячее дутье; ← . . . — выброс)

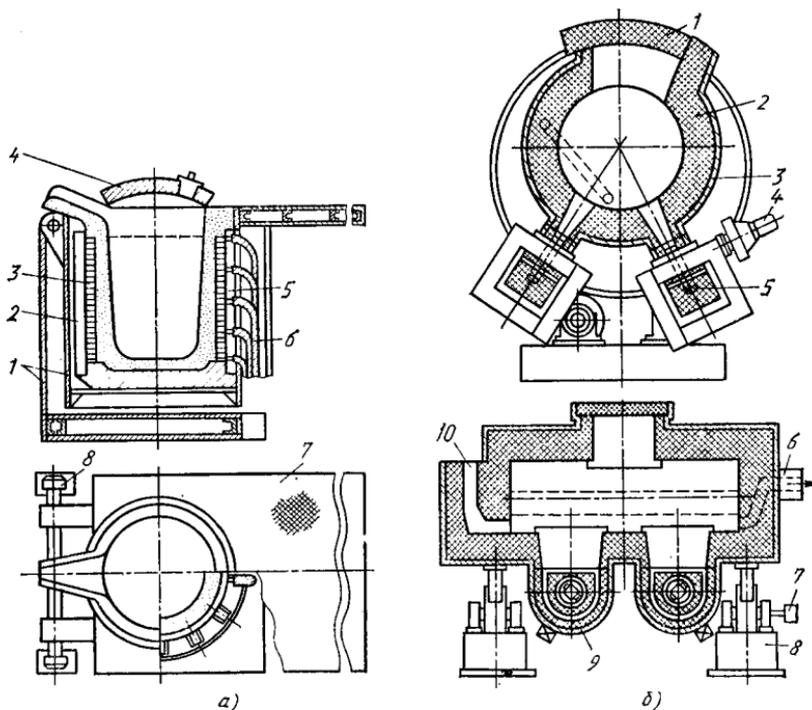


Рис. 91. Индукционные печи:
а — тигельная; *б* — канальная

скрубберах и скоростных пылеуловителях с трубами Вентури. Для предварительной очистки применяют также сухие циклоны и мультициклоны различной конструкции, которые задерживают 99,9 % пыли, размер частиц которой более 40 мкм. В отдельных случаях высокая степень очистки обеспечивается более дорогими и сложными устройствами, к которым относятся дезинтеграторы, тканевые фильтры и системы электростатического осаждения.

Плавка чугуна в электропечах. Плавка чугуна в тигельных индукционных печах промышленной частоты имеет ряд преимуществ: возможность получения точного химического состава, низкий угар элементов (что особенно важно при выплавке легированного чугуна), высокий перегрев металла, возможность использования в шихте большого количества стальных отходов и стружки.

Тигельная индукционная печь (рис. 91, *а*) состоит из металлического кожуха 1, в котором установлен тигель 2, закрывающийся крышкой 4. При плавке шихты загружается в тигель, который установлен в индукторе 3, связанном с магнитопроводами 5 и системой водяного охлаждения 6. Протекающий в индукторе переменный ток возбуждает в садке вихревые токи, разогревающие и плавящие металл. Печь размещается на площадке 7 и при сливе металла наклоняется с помощью механизма поворота 8.

Печи большой емкости часто выпускают в комплекте с установкой для предварительного подогрева шихты в загрузочной бадье, что обеспечивает повышение производительности печи.

Недостаток этих печей — малая скорость плавления твердой завалки. Поэтому для повышения производительности и снижения расхода электроэнергии плавку, как правило, ведут на «болоте», т. е. при выпуске сливают не более половины металла. Затем в жидкую ванну загружают твердую шихту, расплавляют, и цикл повторяется.

Тигли изготавливают в основном из кислой сухой набивной массы, содержащей молотые кварциты. Для спекания массы добавляют 1,5—2 % связующего — борной кислоты. Иногда используют нейтральные футеровочные массы на основе дистенсилиманина или муллитокорунда. Стойкость тигля зависит от многих факторов: зернового состава огнеупорной массы, технологии набивки, режима спекания, состава шихты, температуры перегрева металлической ванны и т. д. Обычно тигель выдерживает от 100 до 300 плавов.

При индукционной плавке вследствие активного перемешивания расплава металлургическое взаимодействие жидкого чугуна со шлаком, футеровкой и газовой фазой происходит весьма интенсивно. В первую очередь идут различного рода окислительные реакции. Взаимодействие металла с футеровкой, при котором кремний восстанавливается углеродом расплава, может привести к глубокому разгару стенки тигля и даже к короткому замыканию витков индуктора. В зоне шлакового пояса износ футеровки максимален, здесь часто образуются трудноудаляемые настывы шлака, затрудняющие дальнейшую эксплуатацию тигля. Все это предопределяет необходимость постоянного контроля режима плавки, качества шихты, состояния футеровки тигля и т. д.

Одним из наиболее важных этапов плавки, особенно при получении синтетического чугуна на базе шихты из стальных отходов, является процесс науглероживания. Наилучшие результаты по степени усвоения в жидком металле (90—95 %) обеспечивает графитированный графит или электродный порошок (стружка), причем 70 % карбюризатора загружают вместе с шихтой и 30 % — в жидкий чугун после расплавления.

Наиболее совершенным и эффективным процессом как с точки зрения качества получаемого чугуна, так и с экономической точки зрения является дуплекс-процесс. При этом процессе получают чугун в двух последовательно работающих плавильных агрегатах: в первом расплавляют шихту, а во втором жидкий чугун подвергается температурно-временной обработке, и при необходимости проводится доводка химического состава. В качестве первичных агрегатов обычно используют вагранку или индукционную тигельную печь, а вторичного — канальную индукционную, тигельную или дуговую печь.

Канальная индукционная печь (рис. 91, б) установлена на опорах 8 и состоит из металлического кожуха 3, футеровки 2 и закрывается сверху крышкой 1. Принцип действия печи основан на использовании тока короткого замыкания. Трансформатор индукционной единицы 9 выполнен таким образом, что петля жидкого металла в канале 5 является вторичной короткозамкнутой обмоткой, разогревающейся при пропускании тока. Заливку металла в печь производят через лётку 10, а слив — через выпускную лётку 6, поворачивая печь с помощью механизма 7. Для охлаждения индукционной единицы служат вентиляторы 4. Канальные печи отличаются от тигельных более высоким КПД, средний удельный расход электроэнергии при перегреве металла ниже на 30—40 %.

Для плавки и выдержки чугуна дуговые электропечи прямого нагрева, в отличие от индукционных, используют значительно реже, хотя они имеют ряд преимуществ: высокий КПД при расплавлении, возможность проведения металлургических процессов в восстановительной и нейтральной атмосферах (что часто необходимо при получении высокопрочного чугуна), большая производительность. Однако эти печи имеют и существенные недостатки: низкий КПД при перегреве, значительный шум, выделение дыма при работе, большой угар элементов.

Экспресс-контроль чугуна при плавке и разливе. Температуру жидкого металла чаще всего контролируют оптическими пирометрами, однако точность показаний при этом зависит от квалификации оператора и наличия шлака или дыма у поверхности расплава. Наиболее точную оценку температуры обеспечивают контактные методы с использованием термопар погружения.

Склонность чугуна к отбелу определяют просто и быстро. Для анализа заливают клиновые пробы или пробы на кокиль и измеряют глубину отбеленного слоя.

Химический анализ чугуна в небольших литейных цехах выполняется традиционными аналитическими, спектральными и физическими методами контроля. В условиях крупномасштабного производства целесообразно применять многоканальные автоматические спектрографы, позволяющие за 1—3 мин определить содержание всех основных, легирующих элементов и примесей.

Для оперативной корректировки технологии плавки и разлива существуют методы экспресс-контроля чугуна непосредственно у плавильного агрегата. Для термоэлектрического экспресс-анализа содержания кремния заливают небольшой образец, который затем помещают в прибор между холодным и горячим контактными электродами. Полученная разность температур преобразуется в электродвижущую силу, величина которой пропорциональна содержанию кремния. Продолжительность анализа 5—8 мин.

Более универсальным является термический анализ жидкого металла по кривым охлаждения. Метод состоит в непрерывном замере температуры при охлаждении пробы жидкого чугуна, залитого в специальный тигель с термоэлементом, и вычерчивании кривой. Углеродный эквивалент и содержание углерода и кремния определяют по температурным остановкам, соответствующим температурам ликвидуса и солидуса сплава.

ГЛАВА 10. СТАЛЬНЫЕ ОТЛИВКИ

Литейные стали так же, как и чугуны, являются многокомпонентными железоуглеродистыми сплавами, содержание углерода в которых ограничивается 2 %. Однако в большей части промышленных марок концентрация углерода составляет десятые и сотые доли процента.

Наряду с С в сталях присутствуют Mn, Si, Al, S, P, N, H, O и другие элементы, попавшие в нее из шихтовых материалов, атмосферы печного пространства или введенные по технологическим соображениям в процессе выплавки. Легирующие элементы добавляют для придания сплавам особых физических, физико-химических свойств или повышения их механических характеристик. Это чаще всего Cr, Ni, Mo, V, W, Ti, B, а также Mn и Si в количествах, превышающих потребности раскисления. Сталь может содержать также случайные примеси, количество которых ограничивается соответствующими стандартами. В углеродистых (нелегированных) сталях случайными примесями являются Cr, Ni, Cu и др.

Сталь как литейный сплав начали применять значительно позже чугуна, после создания плавильных печей, обеспечивших возможность ее расплавления и перегрева. Производство отливок из стали по темпам роста значительно опережало другие отрасли литейного производства как в годы предвоенных, так и послевоенных пятилеток (индустриализация, восстановление промышленных предприятий). В настоящее время наша страна является самым крупным производителем стальных отливок. Весьма обширна номенклатура изделий. Наша промышленность выпускает отливки массой от нескольких граммов до сотен тонн. Сталь широко применяют прежде всего для деталей, которые наряду с высокой прочностью должны обладать хорошими пластическими свойствами, быть надежными и долговечными в эксплуатации. Из литой стали изготавливают целый ряд ответственных деталей для атомных энергетических установок. Чем ответственнее назначение машины и тяжелее условия, в которых она работает, тем значительнее доля стальных отливок, идущих на ее изготовление.

§ 1. КЛАССИФИКАЦИЯ СТАЛЬНЫХ ОТЛИВОК

Стальные отливки можно классифицировать по химическому составу, структуре, назначению, способу выплавки стали.

По химическому составу отливки подразделяют на четыре класса: 1) из нелегированной (углеродистой) стали; 2) из низколегированной стали (суммарное содержание легирующих элемен-

тов ~ 2,5 %); 3) из среднелегированной стали с содержанием 2,5—10 % легирующих элементов; 4) из высоколегированной стали с содержанием легирующих элементов более 10 %.

По структуре целесообразно отдельно классифицировать нелегированные и легированные стали, так как одинаковые структурные составляющие в зависимости от количества растворенного в них легирующего элемента обладают различными свойствами. Отливки из углеродистой стали могут иметь ферритную и перлитную структуры и относиться соответственно к ферритному и перлитному классам. Следует отметить, что в реальных сплавах (даже низкоуглеродистых) чисто ферритной структуры не наблюдается. По границам зерен феррита выпадает третичный цементит. В заэвтектидных углеродистых сталях наряду с перлитом выделяется вторичный цементит.

Отливки из высоколегированных сталей по структуре делят на шесть классов.

По назначению или служебным свойствам стальные отливки подразделяют на две большие группы:

отливки из конструкционной стали изготовляют преимущественно из углеродистых и низколегированных сплавов; основными характеристиками отливок этой группы являются механические свойства;

отливки из сталей со специальными физическими, химическими, физико-химическими и другими свойствами (жаропрочные, жаростойкие, коррозионно-стойкие, износостойкие, кавитационно-стойкие и др.); определяющими характеристиками отливок данной группы являются их специальные свойства.

По способу выплавки различают стали, полученные в печах с кислотой и с основной футеровками. Многие нелегированные (углеродистые) и значительную часть низколегированных сталей выплавляют в кислых печах, а средне- и высоколегированные сплавы—в основных печах. Основной процесс выплавки необходим для приготовления стали с низким содержанием серы и фосфора.

Для выплавки литейных сталей на практике широко применяют следующие плавильные агрегаты:

1) кислые и основные дуговые печи (сейчас в них выплавляют более 90 % литейных сталей для изготовления самых разнообразных по массе и конфигурации отливок в цехах массового и мелкосерийного производства);

2) кислые и основные индукционные печи (в цехах, выпускающих мелкие отливки различного назначения);

3) кислые и основные мартеновские печи (в старых цехах, при реконструкции их заменяют электропечами);

4) установки электрошлакового переплава (в цехах, выпускающих особо ответственные отливки специального назначения);

5) конверторы с верхним кислородным дутьем (для производства крупных отливок преимущественно на металлургических заводах).

Иногда используют комбинированные процессы выплавки стали: последовательно в двух или трех агрегатах.

В последние годы в литейном производстве, как и в черной металлургии, расширяется применение технологии выплавки, предусматривающей проведение некоторых операций вне печи (в ковше).

§ 2. ОТЛИВКИ ИЗ НЕЛЕГИРОВАННОЙ (УГЛЕРОДИСТОЙ) СТАЛИ

Из нелегированной стали изготавливают около 2/3 стальных отливок. По технологическим (литейным) свойствам углеродистая сталь уступает чугуну, тем не менее из нее можно получать сложные отливки, разнообразные по конструкции, размерам, массе, толщине стенок. Литая углеродистая сталь после термической обработки обладает высокими механическими свойствами.

В зависимости от содержания углерода сталь делят на низкоуглеродистую (до 0,2 % С), среднеуглеродистую (0,2—0,45 % С), высокоуглеродистую (более 0,45 % С). Углерод является основным элементом, определяющим механические свойства углеродистых сталей. Увеличение содержания углерода повышает прочность и снижает пластичность (рис. 92). Такое изменение свойств связано с тем, что по мере увеличения концентрации углерода в структуре возрастает количество перлита — более прочной, но менее пластичной, чем феррит, составляющей.

Для углеродистой стали, как для конструкционного материала, важной характеристикой является отношение предела текучести σ_T к временному сопротивлению σ_B , выраженное в процентах. С увеличением концентрации углерода σ_T увеличивается менее интенсивно, чем σ_B , поэтому в конструкциях наибольшее распространение получили отливки из среднеуглеродистой стали. В большинстве случаев содержание углерода выше 0,45 % только с целью обеспечения специальных свойств отливок. Стали с высоким содержанием углерода относят иногда к группе специальных высокоуглеродистых сталей. Низкое содержание углерода (менее 0,1 %) требуется также при необходимости получения отливок со специальными свойствами.

В ГОСТ 977—75 включено девять марок нелегированной конструкционной стали, отличающихся содержанием углерода. По качественным показателям, устанавливаемым в зависимости от назначения и предъявляемых требований, отливки подразделяют на три группы:

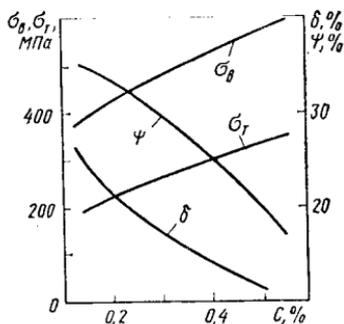


Рис. 92. Влияние углерода на механические свойства литой конструкционной нелегированной стали (после нормализации)

I — отливки общего назначения; контролируют их внешний вид и размеры, химический состав сплава;

II — отливки ответственного назначения; дополнительно контролируют прочность (σ_T или σ_B) и относительное удлинение (δ);

III — отливки особо ответственного назначения: дополнительно контролируют ударную вязкость. С учетом группы качества отливки марку стали обозначают: сталь 35Л-III.

Углеродистая сталь всех марок содержит кремний и марганец, которые вводят главным образом для раскисления, а марганец и для нейтрализации вредного действия серы. Существенного влияния на механические свойства они не оказывают.

Содержание серы в основной и кислой стали для отливок III группы качества ограничивается соответственно 0,045 % и 0,05 %, а фосфора — 0,04 % и 0,05 %. Во всех случаях серу и фосфор желательно иметь в минимальном количестве. Сера усиливает красноломкость стали, склонность ее к образованию горячих трещин. Для отливок сложной конфигурации и для толстостенных отливок, в которых в результате ликвации возможно местное увеличение концентрации серы, целесообразно ограничивать ее содержание 0,035 %. Фосфор понижает пластичность стали при нормальной и низких температурах, входя в раствор с Fe_α и образуя по границам зерен фосфидную эвтектику. Вредное влияние фосфора особенно резко проявляется в сталях с повышенным содержанием углерода. Учитывая возможность ликвации, для особо ответственных и массивных отливок желательно ограничить содержание фосфора 0,03 %.

Механические свойства стали определяют на образцах, вырезанных из пробных брусков, которые отливают в середине разливки плавки и подвергают термообработке совместно с отливками данной партии. Свойства стали отливок, самые тонкие стенки которых имеют толщину более 100 мм, устанавливают согласно особым техническим условиям.

Из низкоуглеродистых литейных сталей изготавливают детали, которые должны обладать высокой пластичностью. Однако такие стали недостаточно тверды даже после закалки, поэтому для обеспечения их долговечности целесообразно проводить цементацию или другую химико-термическую обработку с последующей закалкой и отпуском. Из низкоуглеродистой (магнитомягкой) стали получают отливки деталей электродвигателей и т. п.

Высокоуглеродистые стали предназначены для отливок, работающих в абразивной среде без ударов.

Особенности изготовления отливок. Изготавливать стальные отливки более сложно и трудоемко, чем отливки из серого чугуна. Специфические условия сталелитейного производства обусловлены способами выплавки и литейными свойствами стали.

Ж и д к о т е к у ч е с т ь углеродистой стали в среднем в 2 раза меньше жидкотекучести серых чугунов. Пределы доступного регулирования жидкотекучести более узки, и проводить это

регулирование сложно. Низкая жидкотекучесть стали объясняется относительно высокими вязкостью и поверхностным натяжением при температурах разливки, а также значительно меньшим перегревом.

Жидкотекучесть углеродистой стали в значительной мере определяется содержанием в ней углерода. При повышении содержания углерода практическая жидкотекучесть (при одинаковой температуре заливки) возрастает. Это вызвано прежде всего

увеличением относительного перегрева над температурой ликвидуса. Расширение же интервала кристаллизации с увеличением содержания углерода оказывает менее сильное противоположное влияние.

Истинная жидкотекучесть (при одинаковом перегреве над температурой нулевой жидкотекучести $t_{н.ж}$) понижается с увеличением содержания углерода, так как перегрев над температурой ликвидуса уменьшается и жидкотекучесть все больше определяется состоянием сплава в интервале кристаллизации (рис. 93).

Марганец и кремний (в пределах их обычного содержания) не изменяют заметно интервал кристаллизации, вязкость и другие свойства стали, поэтому их влияние на жидкотекучесть также несущественно. Следует отметить, что жидкотекучесть стали будет тем выше, чем полнее она раскислена.

Как известно, концентрацию серы и фосфора в углеродистой стали для получения высокой прочности и пластичности желательно иметь минимальной, а в допустимых пределах их практическое влияние на жидкотекучесть не обнаруживается.

На жидкотекучесть отрицательно влияют тугоплавкие неметаллические включения, попавшие в сталь в период выплавки, а особенно раскисления.

Первичная кристаллизация, обуславливая структуру отливки, во многом определяет ее свойства. Характер первичной кристаллизации зависит от свойств сплава и условий производства отливки. Существенное влияние оказывает концентрация углерода.

Наибольшей склонностью к образованию обширной зоны столбчатых кристаллов обладают стали, содержащие $\sim 0,2\%$ С. По мере увеличения концентрации углерода (до $0,8\%$ С) уменьшается

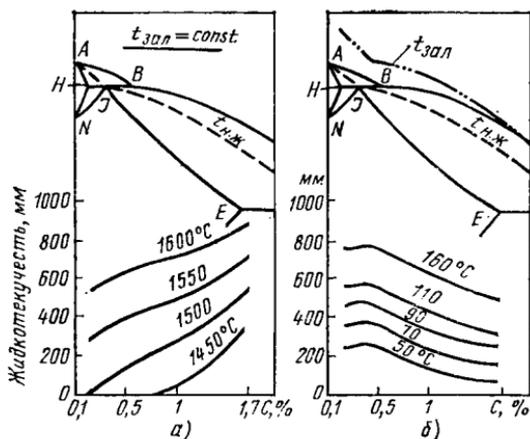


Рис. 93. Влияние углерода на практическую (а) и истинную (б) жидкотекучесть стали

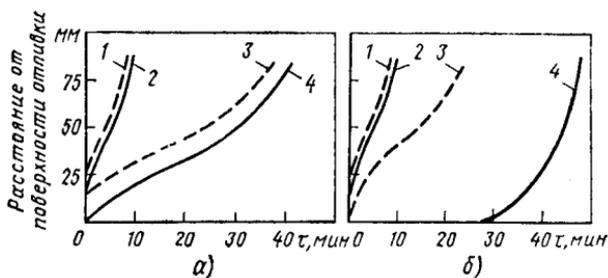


Рис. 94. Кинетика продвижения изоликвидуса (1, 3) и изосоллидуса (2, 4) при затвердевании в сырых песчаных (3, 4) и металлических (1, 2) формах стали с содержанием углерода, %:

а — 0,1; б — 0,6

зона транскристаллизации, что объясняется главным образом влиянием углерода на интервал кристаллизации сплава и его теплофизические свойства. Протяженность по сечению отливки зоны двухфазного состояния с повышением концентрации углерода возрастает (рис. 94). Изменением перегрева стали, температуры заливаемого сплава, скорости охлаждения, а также модифицированием можно регулировать первичную структуру стальных отливок.

Следует отметить, что высокие перегрев и температура заливаемой стали вызывают огрубление структуры, поэтому их верхний уровень определяют, как правило, только исходя из условий заполнения всей полости литейной формы. В этом существенное влияние температурно-временных факторов на свойства стальных и чугунных отливок.

Усадка стали в отливке складывается из уменьшения объема в жидком состоянии при охлаждении от $t_{\text{вал}}$ до $t_{\text{л}}$, из уменьшения объема в интервале ($t_{\text{л}} - t_{\text{с}}$) при изменении агрегатного состояния и, наконец, из изменения объема при охлаждении затвердевшей стали от температуры конца затвердевания до нормальной температуры (рис. 95). О развитии усадки углеродистой стали (0,35 % С) в различных температурных интервалах можно судить по изменению величины удельного объема этого сплава.

Усадка в жидком состоянии определяется коэффициентом объемного сжатия $\beta_{\text{ж}}$ и величиной перегрева над температурой плавления. Для углеродистой стали в жидком состоянии коэффициент $\beta_{\text{ж}} = 1,5 \cdot 10^{-4}$. Этот коэффициент увеличивается на 20 % при повышении содержания углерода на 1 %. Марганец, кремний, сера и фосфор заметно не влияют на коэффициент термического сжатия углеродистой стали.

Изменение объема стали при затвердевании определяется сжатием при переходе в твердое состояние и усадкой в температурном интервале ($t_{\text{л}} - t_{\text{с}}$). С повышением содержания углерода увели-

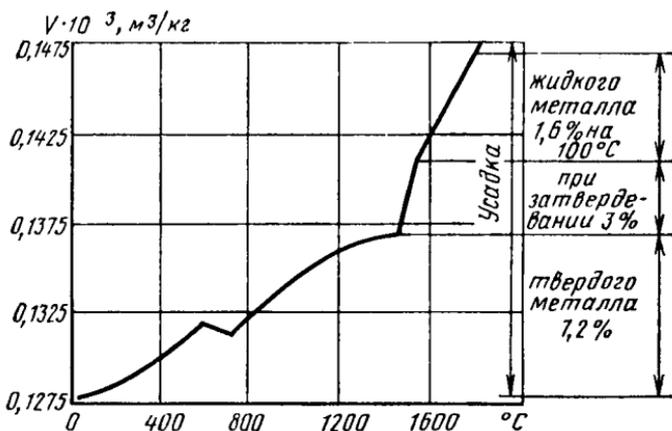


Рис. 95. Изменение удельного объема нелегированной (0,35 % С) стали, залитой при 1725 °С, в процессе охлаждения (по данным Ю. А. Нехендзи)

чивается интервал кристаллизации, а следовательно, возрастает и усадка

Содержание углерода, % 0,1 0,35 0,45 0,7
 Сокращение объема стали при затвердевании, % 2 3 4,3 5,3

Усадка стали в твердом состоянии складывается из доперлитной усадки в интервале ($t_c - t_{\gamma \rightarrow \alpha}$), расширения при фазовом $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращении и послеперлитной усадки при дальнейшем охлаждении.

Суммарное сокращение объема в твердом состоянии составляет 7,2—7,5 %, а линейных размеров — 2,4—2,5 % (свободная линейная усадка).

С повышением содержания углерода линейная усадка в твердом состоянии уменьшается главным образом за счет уменьшения доперлитной усадки (табл. 19). Исключение составляют стали, содержащие $\sim 0,18$ % С. Повышенная усадка в этом случае

Таблица 19

Зависимость линейной усадки сталей от содержания углерода (по данным Ю. А. Нехендзи)

Содержание углерода, %	Линейная усадка, %			Линейное расширение ($\gamma \rightarrow \alpha$), %
	доперлитная	послеперлитная	свободная	
0,08	1,42	1,16	2,47	0,11
0,14	1,52	1,06	2,46	0,11
0,35	1,47	1,04	2,40	0,11
0,45	1,39	1,07	2,35	0,11
0,55	1,35	1,05	2,31	0,09
0,9	1,21	0,98	2,18	0,01

объясняется резким сокращением объема при перитектической реакции ($\delta \rightarrow \gamma$). Снижение доперлитной усадки вызвано уменьшением температурного интервала усадки ($t_c - t_{\gamma \rightarrow \alpha}$). Этот фактор имеет решающее значение, и доперлитная усадка снижается несмотря на то, что коэффициент термического сжатия при повышении содержания углерода увеличивается.

В реальных условиях действительное изменение линейных размеров стальных отливок (литейная усадка) меньше свободной линейной усадки стали. В результате торможения усадки, главным образом доперлитной при высоких температурах, происходит пластическая деформация, несколько уменьшающая общее изменение размеров.

Литейная усадка тонкостенных отливок сложной конфигурации составляет 1,25—1,5 %, толстостенных — 2—2,3 %. Даже в условиях торможения литейная усадка обычно не бывает меньше 1 %, иначе в отливках образуются трещины.

Торможение усадки, особенно в высокотемпературной области, если даже оно и не привело к появлению трещин, является причиной заметного снижения пластичности и ударной вязкости в результате появления деформационной пористости. По данным А. М. Михайлова, А. А. Тимофеева и В. В. Требухина, снижение относительного удлинения и ударной вязкости стали 35Л достигает соответственно 40 и 30 %.

Особенности литейных свойств углеродистой стали вызывают необходимость разработки специфической технологии производства фасонных отливок.

Сталь выплавляют в агрегатах периодического действия, т. е. металл выдается через определенные промежутки времени. Емкость плавильных агрегатов для этих условий выбирают с учетом допустимых продолжительности разлива всей плавки и максимального числа открытий стопора ковша при разливе металла по формам. Число открытий стопора, изготовленного из шамотного припаса, составляет в среднем 120. В сталелитейных цехах наиболее распространены печи емкостью 3, 5 и 10 т.

В фасонно-сталелитейных цехах большой мощности, производящих мелкие и средние отливки, при выборе емкости плавильного агрегата учитывают необходимость непрерывной подачи стали на заливочную ветвь конвейера. В этих случаях устанавливают много печей малой емкости, что обеспечивает выдачу металла из разных печей через короткие промежутки времени (не реже 2—3 раз в час). Крановый стопорный ковш часто является промежуточной емкостью, из которой сталь распределяется по раздаточным ковшам. Заливка движущихся на конвейере форм из кранового стопорного ковша невозможна, так как трудно добиться синхронности движения мостового крана и конвейера. Температура стали перед заливкой 1600—1550 °С. В связи с этим к формовочным и стержневым смесям предъявляют высокие требования по огнеупорности. Исходными материалами для смесей

являются чистые кварцевые пески и огнеупорные глины. Глинистые пески в сталелитейных цехах, как правило, не применяют. Заливка из стопорного ковша обуславливает значительное действие струи металла на форму, поэтому ее необходимо изготавливать прочной, с большей степенью уплотнения смеси. Худшая по сравнению с другими сплавами жидкотекучесть стали, меньший относительный перегрев требуют увеличения размеров каналов литниковой системы, сокращения ее протяженности. По данным Б. Б. Гуляева, площадь сечения питателей при литье стали должна быть в 1,5—2 раза больше, чем при литье чугуна. В случае изготовления крупных отливок (массой более 10 т) эта разница может увеличиться до 3 раз.

Применение стопорных ковшей позволяет несколько упростить литниковую систему: вместо чаши применяют воронки, не устанавливают фильтровальные сетки, шлакоуловители, по возможности уменьшают суммарную протяженность каналов. Площади сечения питателя, литникового хода и стояка рекомендуется делать одинаковыми.

Чтобы исключить механическое разрушение стенок литниковых каналов в крупных формах, их изготавливают из огнеупорного сифонного припаса. Конструкция литниковой системы определяется конфигурацией и массой отливки, а также наиболее рациональным местом подвода металла. Для отливок массой до 100 кг применяют преимущественно литниковые системы с боковым подводом металла по разьему формы; для отливок массой 100—500 кг — с боковым и нижним подводом. Формы тяжелых отливок (500 кг и выше) заливают, как правило, через сифонные или ярусные литниковые системы. В зависимости от конфигурации отливки, ее назначения и ответственности металл подводится:

в толстые стенки (лучше в прибыли, так как это повышает коэффициент использования металла прибыли) для создания направленного затвердевания, обеспечивающего получение плотной отливки;

рассредоточенно через большое число литников, чтобы добиться равномерного охлаждения частей отливки и, следовательно, меньших напряжений, что целесообразно при изготовлении тонкостенных протяженных отливок;

к тонким частям, чтобы по возможности выравнять скорости охлаждения частей отливки, склонных к образованию трещин. Для питания массивных частей в этом случае целесообразно использовать прибыли, работающие под избыточным давлением газа или воздуха.

Усадка стали в жидком состоянии и в период кристаллизации, если не принимать специальных мер, вызывает образование усадочных раковин и пористости. Получение плотных отливок обеспечивается установкой прибылей и созданием направленного, последовательного затвердевания. Без прибылей из стали можно изготавливать только малоответственные тонкостенные отливки.

Усадка стали в твердом состоянии может вызвать образование горячих и холодных трещин, коробление отливок, высокие внутренние напряжения и изменение линейных размеров. Горячие трещины в отливках из углеродистой стали являются следствием сильного торможения, главным образом со стороны формы, доперлитной усадки. Трещины располагаются в наиболее слабых местах, какими являются разогретые участки.

Увеличение содержания углерода (см. табл. 11) уменьшает линейную усадку, особенно доперлитную, что снижает опасность образования горячих трещин. С другой стороны, при охлаждении низкоуглеродистых сталей быстрее увеличивается их прочность. Отливки, испытывающие большое механическое торможение усадки, рекомендуется изготовлять из углеродистой стали с повышенным или очень низким содержанием углерода. Разностенные отливки со значительным термическим торможением усадки целесообразнее получать из низкоуглеродистой стали. Отрицательное влияние на трещиностойкость оказывают сера и неметаллические включения, особенно легкоплавкие. Отмечается большая склонность к образованию трещин кислых сталей. Основные мероприятия по предотвращению появления горячих трещин заключаются в улучшении технологии изготовления форм, обеспечении хорошей их податливости, выборе конструкции отливки, литниковой системы, в рациональном режиме заливки и охлаждения.

Кроме уменьшения усилий, затрудняющих усадку, образование горячих трещин предупреждают упрочнением слабых мест отливки усадочными ребрами и установкой холодильников. Усадочные ребра воспринимают часть усилий, тем самым разгружают слабое (горячее) место отливки. Холодильники, наружные или внутренние, способствуют более быстрому охлаждению и, следовательно, упрочнению опасного участка отливки.

В области температур ниже 650°C под действием внутренних напряжений или внешних нагрузок в углеродистой стали возникают преимущественно упругие деформации. При охлаждении отливки происходит дальнейшее изменение ее линейных размеров в результате фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения и послеперлитной усадки. Всякое препятствие развитию усадки вызывает образование внутренних напряжений, которые могут привести к короблению отливки или образованию холодных трещин. Металл в этом случае разрушается не по границам зерен, а по самим зернам. Поверхности трещин не окисляются.

Наибольшей склонностью к образованию холодных трещин обладают отливки из высокоуглеродистых сталей. Повышение содержания углерода вызывает увеличение среднего коэффициента термического сжатия. Например, коэффициент термического сжатия стали с 0,14 % С равен $14,5 \cdot 10^{-6}$, стали с 0,45 % С — $16,1 \cdot 10^{-6}$. Высокоуглеродистые стали менее теплопроводны, чем низкоуглеродистые, что обуславливает больший перепад температур по се-

чению отливки и между отдельными ее частями. Таким образом, из-за увеличения термических напряжений с повышением содержания углерода увеличивается и опасность образования холодных трещин.

§ 3. ОТЛИВКИ ИЗ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

Легирование стали является одним из средств увеличения надежности, долговечности и снижения массы литых деталей, а также придания им специальных свойств. Выбор легирующих элементов обуславливается главным образом назначением отливки, ее конструктивными и технологическими особенностями.

Элементы, используемые для легирования стали, классифицируют по строению кристаллической решетки, влиянию на температуру полиморфных превращений и отношению к углероду.

По строению кристаллической решетки легирующие элементы подразделяют на три группы. В первую группу входят хром, вольфрам, молибден с объемно-центрированной кубической решеткой и кремний, который имеет сложную кубическую решетку.

Ко второй группе относятся никель, медь, алюминий с гранецентрированной кубической решеткой и марганец со сложной решеткой.

Элементы с гексагональной решеткой — титан, кобальт, бериллий и некоторые редкоземельные металлы составляют третью группу.

Классификация по этому признаку дает возможность судить о растворимости элементов в железе той или иной модификации, о влиянии элемента на свойства твердого раствора. Растворимость элементов определяется типом и параметрами кристаллической решетки. Неограниченной растворимостью в железе обладают элементы, атомный радиус которых отличается от атомного радиуса железа не более чем на 8 % и имеющие однотипную с ним решетку. Другие элементы растворимы ограниченно или нерастворимы. Чем больше отличаются решетки и атомные радиусы легирующего элемента и железа, тем больше прочность образуемого твердого раствора. Элементы, атомный радиус которых близок к атомному радиусу железа, дают более пластичные растворы.

Под влиянием легирующих элементов значительно изменяются температуры полиморфных превращений. Элементы Ni, Mn, C, Co, N, Si расширяют область устойчивости аустенита, под влиянием этих элементов повышается температура A_1 и снижается A_3 . Элементы Cr, Si, Al, W, V, Mo, Ti, Be замыкают область γ , снижая точку A_1 и повышая A_3 . При определенных концентрациях легирующего элемента образуются ферритные сплавы. Эти элементы можно разделить на элементы, образующие сплавы со структурой неограниченного гомогенного твердого раствора, и элементы, образующие сплавы, область гомогенности которых ограничена вследствие появления новых фаз.

По отношению к углероду легирующие элементы подразделяют на карбидообразующие и графитизирующие.

Легирующие элементы вызывают образование новых структурных составляющих и изменение свойств существующих фаз. Введением в сталь определенных элементов в строго заданных количествах можно добиться значительного улучшения имеющихся свойств или получения специальных свойств.

Отливки из низколегированных конструкционных сталей. Легирование позволяет значительно повысить механические свойства литейных сталей, особенно после специальных видов термической обработки. Как правило, эти стали характеризуются более высоким значением σ_T/σ_B (до 70 %), чем углеродистые.

В ГОСТ 977—75 наряду с 9 марками нелегированных сталей включена 21 марка низколегированных. Целый ряд марок конструкционных сталей регламентирован отраслевыми стандартами.

Наибольшее распространение получили стали, легированные кремнием, марганцем, хромом, никелем, ванадием, молибденом, медью в различных комбинациях и соотношениях.

Кремний растворяется в феррите и цементите. Образует раствор, кремний упрочняет феррит и повышает его твердость. При малых концентрациях кремния (до 1 %) не уменьшается и пластичность феррита. Свойства и область применения сталей, легированных кремнием, в большой степени определяются содержанием углерода. Наиболее широко используют низкоуглеродистую кремнистую сталь (0,1—0,2 % C; 1 % Si), высокоуглеродистую кремнистую сталь (0,4—0,5 % C; 1,4—1,6 % Si), графитизированную сталь (1,25—1,50 % C; 1—1,35 % Si).

Низкоуглеродистая кремнистая сталь характеризуется более высокими пластическими свойствами (в 1,5 раза), чем равнопрочная нелегированная. Эти свойства определяют ее применение для отливки эксцентров, шестерен и деталей, работающих в условиях динамических нагрузок.

Высокоуглеродистая кремнистая сталь обладает большей износостойкостью, но невысокой пластичностью. Из нее изготавливают катки мостовых кранов, шестерни мельниц и детали, работающие в пыльной среде.

Графитизированная сталь сочетает свойства чугуна и стали. В литом состоянии структура состоит из крупнопластинчатого перлита и игольчатого цементита. Вид термической обработки выбирают в зависимости от назначения отливки. Штампы, фильеры и детали, от которых требуется высокая твердость, подвергают низкотемпературному отжигу ($\sim 700^\circ\text{C}$) для снятия напряжений, сфероидизации вторичного цементита и частичного его распада. Степень графитизации при этом минимальна. Отливки, от которых требуются высокие антифрикционные свойства, подвергаются высокотемпературному отжигу ($\sim 1000^\circ\text{C}$) с целью разложения цементита. Для повышения механических свойств иногда после графитизирующего отжига проводят закалку с отпуском.

М а р г а н е ц является элементом, расширяющим область γ -твердого раствора. Основными элементами, определяющими свойства низколегированных марганцовистых сталей, являются марганец и углерод. Образую твердый раствор замещения, марганец упрочняет феррит, но основное влияние на повышение прочности оказывают более устойчивые, чем цементит, сложные карбиды $(Fe, Mn)_3C$.

Содержание углерода и марганца выбирают в зависимости от требуемого соотношения прочности и пластичности. Чем ниже требуемая прочность и выше пластичность, тем больше должно быть в стали марганца и меньше углерода. Низколегированную марганцовистую сталь для фасонных отливок подразделяют на низкоуглеродистую (0,15—0,25 % С; 1,2—1,6 % Мп), среднеуглеродистую (0,3—0,4 % С; 1,1—1,9 % Мп) и повышенной прочности (до 0,4 % С; 1,05—2,0 % Мп). В зависимости от соотношения углерода и марганца, а также от требуемых свойств отливки подвергаются закалке или нормализации с отпуском. Из низколегированных марганцовистых сталей изготавливают отливки, испытывающие значительный износ, ударные и переменные нагрузки. Это детали для железнодорожного транспорта, экскаваторов и др. В ГОСТ 977—75 группа марганцовистых сталей представлена марками 20ГЛ и 35ГЛ.

Н и к е л ь расширяет аустенитную область, образует с железом твердые растворы и не дает карбидов. Упрочняющее действие никеля в низколегированной стали заключается в повышении прочности феррита при одновременном сохранении пластичности. Никель понижает температуру мартенситного превращения, увеличивает прокаливаемость стали. Наиболее распространенная низколегированная никелевая сталь содержит 0,2—0,4 % С и до 2 % Ni. Никелевая сталь обладает повышенной ударной вязкостью даже при низких температурах, равномерностью свойств по сечению отливки. Отливки из никелевой стали с низким содержанием углерода иногда подвергают химико-термической обработке для упрочнения поверхности. С повышением содержания углерода возрастает прочность, но снижается пластичность. Из низколегированных никелевых сталей изготавливают отливки для прокатных станов, горно-обогачительного оборудования, судов, локомотивов.

Х р о м повышает устойчивость феррита, образует прочные карбиды; замещая частично железо в цементите, значительно повышает его устойчивость. Свойства хромистой конструкционной стали определяются как содержанием хрома, так и углерода. Повышение прочности хромистых сталей объясняется главным образом блокированием плоскостей скольжения карбидами $(Fe, Cr)_3C$, а также измельчением зерна. Хром значительно повышает прокаливаемость стали.

Отливки получают из низколегированных хромистых сталей с 0,35—0,60 % С и до 2 % Cr. Стали с низким содержанием угле-

рода наряду с высокой прочностью имеют удовлетворительную пластичность. С повышением содержания углерода пластичность сильно падает, и такие стали можно применять для отливок, подвергающихся повышенному износу при отсутствии ударных нагрузок.

В а н а д и й. Объем производства отливок из ванадиевых сталей в последние годы непрерывно увеличивается. Применение ванадия в небольших количествах ($\sim 0,1\%$) в несколько раз более эффективно, чем применение таких же количеств Mn, Si, Cr, Ni и др.

Ванадий образует прочный карбид VC, который существует наряду с цементитом. Мелкодисперсный карбид VC выделяется при охлаждении из аустенита, выполняя роль упрочняющей фазы. Оказывая заметное упрочняющее влияние, этот карбид практически не снижает пластичность, трещиностойчивость, свариваемость сталей.

Более часто используют конструкционные стали, легированные несколькими элементами одновременно. В этом случае легче достигается оптимальное сочетание прочности и пластичности. Сложнолегированные стали применяются для изготовления сложных высоконагруженных отливок.

Наиболее распространенными из них являются стали 30ГСЛ, 35ХГСЛ (хромансиль), 35ХМЛ, 35НГМЛ, 30ХНМЛ, 08ГДНФЛ и др. Молибденсодержащие стали характеризуются меньшей отпускной хрупкостью, лучшей прокаливаемостью.

В технической литературе приводятся примеры сложнолегированных конструкционных литейных сталей, имеющих в своем составе более десятка легирующих элементов. Предел текучести некоторых из них достигает 1800 МПа при относительном удлинении $\sim 15\%$.

Отливки из высоколегированных сталей со специальными свойствами. Среди высоколегированных сталей, применяемых для изготовления фасонных отливок, наибольшее распространение получили износостойкие стали 110Г13Л, 120Г13Х2БЛ, 130Г14ХМФАЛ (ГОСТ 2176—77), а среди них, в свою очередь, сталь 110Г13Л. По структуре она относится к аустенитному классу. Устойчивая аустенитная структура образуется в Fe—Mn—C-сплавах, содержащих 1—1,3 % С и 9—15 % Mn. Медленно охлажденные сплавы этого состава состоят из аустенита и карбидной фазы переменного состава (Fe, Mn)₃C. Аустенит представляет собой твердый раствор замещения марганца в железе, в котором углерод находится между узлами кристаллической решетки. Отливки подвергают закалке: нагрев до 1050—1100 °С и охлаждение в холодной воде. После термической обработки сталь 110Г13Л немагнитна, приобретает высокие свойства: $\sigma_B = 800 \div 1000$ МПа; $\sigma_T = 250 \div 400$ МПа; $\sigma_T/\sigma_B = 30 \div 40\%$; $\delta = 40 \div 55\%$; $\psi = 35 \div 45\%$; $KCU = 2000 \div 3000$ кДж/м²; 180—220 НВ.

Уникальным свойством стали является высокое сопротивление износу при работе в условиях ударных или высоких статических нагрузок, когда сталь наклепывается и твердость ее возрастает до 600 НВ. Упрочнение стали при наклепе вызывается дроблением зерна аустенита, выпадением дисперсных карбидов, а также превращением аустенита в мартенсит по плоскостям сдвигов. Склонность к наклепу делает эту сталь труднообрабатываемой. Специфические свойства стали 110Г13Л определили практическую область ее применения. Из этой стали отливают сердечники стрелочных переводов и крестовины трамвайных путей, сменные детали щековых и конусных дробилок, экскаваторов и многих других машин.

Стандарт допускает значительные колебания химического состава, %: 11,5—15 Мп; 0,9—1,4 С; 0,3—1 Si; до 0,12 Р; до 0,05 S. Химический состав зависит от назначения, типа и специфических требований, предъявляемых к изделиям. Для стали 110Г13Л оптимально отношение Мп/С = 10. Повышение содержания углерода уменьшает пластичность, а понижение — износостойкость. Увеличение содержания кремния, желательное для повышения износостойкости, но вызывает образование трещин. Фосфор и сера отрицательно влияют на эксплуатационные и технологические свойства, поэтому их содержание должно быть минимальным.

Необычно высокое содержание фосфора (до 0,12 %) обусловлено тем, что он вносится в сталь на заключительном этапе плавки легирующей дозой ферромарганца, в обычных сортах которого концентрация фосфора составляет 0,35—0,55 %. Ю. А. Шульте с сотрудниками доказал чрезвычайно вредное влияние этой примеси, особенно на пластические свойства. Так, каждая 0,01 % фосфора в пределах марочного состава снижает ударную вязкость на 0,3 мДж/м², относительное удлинение на 1 %. Применение для выплавки стали ферромарганца с низким содержанием фосфора при изготовлении особо ответственных отливок следует признать необходимым.

Сталь 110Г13Л можно выплавлять в дуговых и мартеновских печах. В зависимости от конкретных условий производства (наличия плавильных агрегатов, шихтовых материалов) и требований, предъявляемых к качеству отливок, высокомарганцовистую сталь можно получать из свежих материалов в основных дуговых или мартеновских печах, переплавом отходов производства и лома этой стали в тех же печах, заливкой низкоуглеродистой перегретой стали в ковш с разогретым кусковым ферромарганцем, смешением в ковше низкоуглеродистой стали с расплавленным ферромарганцем.

В СССР сталь 110Г13Л выплавляют преимущественно в дуговых печах с основной футеровкой. При выплавке стали из свежих материалов шихту составляют из отходов углеродистой стали и передельного чугуна в соотношении, обеспечивающем получение

~0,4 % С после расплавления. В качестве шлакообразующего материала в завалку вводят известь.

Процесс плавки состоит как бы из двух этапов: получения низкоуглеродистой стали с 0,1—0,15 % С и легирования этой стали марганцем. После расплавления при нормальном содержании углерода (~0,4 %) проводят кипение металла с помощью железной руды или газообразного кислорода.

В случае использования низкоуглеродистой шихты, когда в ванне после расплавления содержание углерода не превышает 0,15 %, а фосфора 0,03 %, передельный чугун не добавляют, кипение не проводят. После разогрева ванны удаляют окислительный шлак и осуществляют раскисление. Однако сталь, полученная без окисления, менее качественна.

После удаления окислительного шлака проводят предварительное раскисление силикомарганцем или ферромарганцем и ферросилицием. Затем загружают флюсы (известь, плавиковый шпат, молотый кокс и дробленый ферросилиций) для образования белого шлака и перемешивают ванну. Ферромарганец для легирования вводят в три-четыре приема. В печи под белым шлаком протекает диффузионное раскисление; сталь очищается от оксида марганца, отрицательно влияющего на ее эксплуатационные и технологические свойства. Содержание оксида железа в шлаке перед выпуском не должно превышать 1 %. Окончательное раскисление стали проводят на желобе печи алюминием (0,5—0,8 кг алюминия на 1 т металла).

В крупных сталелитейных цехах, специализирующихся на выпуске отливок из стали 110Г13Л, а также получающих стальной лом этой марки, часто применяют метод переплава. В этом случае шихту составляют на 90 % из отходов производства и лома и не более чем на 10 % из низкоуглеродистой стали или же на 100 % из отходов производства. В качестве шлакообразующего материала используют известь, вводя ее при завалке и в период расплавления. После расплавления проводят предварительное раскисление ванны кусковым ферросилицием. Затем в печь подают смесь извести, плавикового шпата, дробленого ферросилиция; в дальнейшем вместо ферросилиция используют молотый кокс. Сталь до заданного состава по марганцу доводят за 10—15 мин до ее выпуска. Продолжительность выдержки под белым шлаком и требования к шлаку остаются теми же, что и при выплавке стали из свежих материалов.

В случае отсутствия основных печей сталь 110Г13Л можно получить методом смешения электростали ($\leq 0,15$ % С; $\leq 0,06$ % Р), выпускаемой при 1600 °С в ковш с разогретым кусковым ферромарганцем. Ковш с ферромарганцем нагревают до 800 °С форсункой. При смешении достигается достаточно полное и быстрое выравнивание концентрации марганца по всему объему стали.

Сталь 110Г13Л может быть также получена смешением в ковше низкоуглеродистой стали, полученной в любом плавильном агре-

гате, с расплавленным (например, в вагранке) ферромарганцем. Качество стали, полученной этими методами, значительно ниже, чем выплавленной из свежих материалов или переплавом.

Особенности технологического процесса получения отливок из стали 110Г13Л определяются специфическими свойствами этого сплава. Интервал его затвердевания 1400—1340 °С, поверхностное натяжение ниже, чем углеродистой стали, в 1,5 раза. Высокомарганцовистая сталь по сравнению с углеродистой характеризуется большим коэффициентом термического сжатия (в 2 раза) и меньшей (в 2 раза) теплопроводностью. Низкая теплопроводность стали делает невозможной сквозную закалку стенок отливок толще 120 мм. Кроме этого, в толстом сечении металл имеет пониженные свойства вследствие сильной трансформации и ликвации углерода, фосфора и серы, поэтому толщина стенок отливки должна быть не более 120 мм.

Высокомарганцовистая сталь из-за присутствия оксида марганца агрессивна по отношению к шамотной футеровке ковша и песчаной форме, поэтому целесообразно применять магнетитовые или графитовые пробки и стаканы сифонного припаса. Во избежание формирования трудноотделимого пригара песчаные формы без покрытий можно применять только при изготовлении тонкостенных отливок. Полость форм средних и крупных отливок целесообразно облицовывать составами из основных огнеупорных материалов (магнетит, хромоманганит) или наносить на поверхность полости покрытия.

Несмотря на высокую жидкотекучесть стали 110Г13Л, разливку ее по формам необходимо проводить с большой скоростью, чтобы исключить значительное окисление. Получение однородных свойств стали во всех отливках предопределяет необходимость разливки всей плавки за короткое время в узком интервале температур и при невысоком перегреве (1420—1500 °С). По данным Ю. А. Шульте, повышение температуры заливаемой в форму стали от 1414 до 1530 °С приводит к снижению σ_b , δ и КСЧ соответственно от 800 до 570 МПа, от 32,5 до 17,4 % и от 2400 до 1230 кДж/м². Такое изменение связано прежде всего с укрупнением аустенитных зерен, т. е. с огрублением структуры.

Принимая во внимание повышенную литейную усадку стали, в состав формовочных смесей часто вводят опилки, применяют оболочковые стержни, т. е. делают все возможное для увеличения податливости формы. Значительная усадка, интенсивное развитие ее в интервале, близком к температуре кристаллизации, низкая прочность и пластичность при высоких температурах обуславливают большую склонность стали 110Г13Л к трещинообразованию. Для борьбы с горячими трещинами, кроме увеличения податливости формы, целесообразно снижать до минимума содержание кремния, фосфора и серы, уменьшать окисленность металла, упрочнять слабые места холодильниками и усадочными ребрами. Из-за низкой теплопроводности и высокого коэффициента терми-

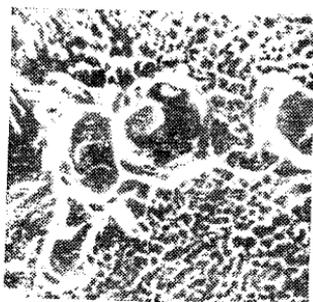


Рис. 96. Фрактограмма излома образца закаленной стали 110Г13Л

ческого сжатия в отливках возникают большие термические напряжения, которые вместе с повышенной хрупкостью (в литом состоянии благодаря присутствию карбидов) часто являются причиной образования холодных трещин. Для борьбы с холодными трещинами используют различные способы выравнивания скоростей охлаждения отдельных узлов отливки.

Режим охлаждения отливки в области высоких температур (950—500 °С) обуславливает количество и размер карбидов, выпадающих из аустенита ввиду снижения растворимости в нем углерода. По данным А. М. Михайлова, В. Б. Беловодского и К. И. Красикова, ускорение охлаждения в интервале интенсивного выделения карбидов позволяет получить более благоприятную литую структуру (мельче карбиды и меньшее их количество). Такое изменение литой структуры в свою очередь дает возможность осуществлять форсированный нагрев отливок под закалку, сокращать продолжительность всего цикла (нагрев и выдержку), добиваться повышения плотности стали. Последнее обстоятельство связано с тем, что карбидная фаза $(\text{Fe, Mn})_3\text{C}$ по сравнению с аустенитом характеризуется большим значением удельного объема, поэтому растворение карбидов в процессе термообработки приводит к возникновению пористости (рис. 96).

Реализация оптимального (ускоренного) охлаждения отливок сердечников стрелочных переводов позволила повысить пластичность стали, ее стабильность и долговечность отливки.

Для получения высоких пластических, прочностных свойств (обеспечения однофазной аустенитной структуры) все отливки подвергают закалке в холодной проточной воде. Исправление дефектов заваркой производят после закалки отливки, в нагретом состоянии. Заваренную отливку подвергают повторной закалке.

Отливки из коррозионно-стойких сталей. Высоколегированные хромистые, хромоникелевые и никельхромистые стали часто (для улучшения их свойств и экономии дефицитного никеля) дополнительно легируют Mo, V, Mn, Cu, Ti, N, B, W. Химические свойства металлов зависят от их сродства к кислороду и способности пассивироваться.

Хром сообщает высоколегированным сталям свойство пассивироваться в окислительных средах. Повышение коррозионной стойкости стали при легировании хромом происходит скачкообразно при концентрации хрома в феррите 1/8 моля (11,7 %). Дальнейшее заметное повышение коррозионной стойкости отмечается при содержании в феррите 2/8, 3/8 и т. д. моля хрома (что соответствует 23,4: 35,1 %). При таких концентрациях хрома

электродный потенциал повышается скачкообразно, резко меняются химические свойства сплава, и на поверхности стали вместо рыхлого слоя оксидов железа появляется плотная тонкая пленка оксидов хрома. Эта пленка и обеспечивает высокую коррозионную стойкость хромосодержащих сталей в окислительных средах.

Никель имеет более высокий электродный потенциал, т. е. меньшее сродство к кислороду, чем железо. При сплавлении никеля с железом кислотостойкость передается сплаву.

На основании изложенного выше, а также с учетом требований, предъявляемых к структуре, механическим свойствам, условиям производства, выбирают оптимальный состав стали. Минимальное общее содержание основного легирующего элемента (хрома) в стали назначают с учетом концентрации углерода и возможности образования карбидной фазы $(Cr, Fe)_2C_3$ или $(Cr, Fe)_4C$. По ГОСТ 2176—77 отливки из коррозионно-стойких сталей подразделяют по структуре на шесть классов.

Стали мартенситного класса (20X13Л, 10X14НДЛ, 09X16Н4БЛ, 09X17Н3СЛ и др.) применяют для изготовления отливок, работающих в малоагрессивной среде и одновременно в условиях умеренных ударных и статических нагрузок (детали повышенной прочности для авиационной, химической и других отраслей промышленности, литые детали турбин с рабочей температурой до 600 °С).

Сталь мартенситно-ферритного класса (15X13Л) обладает удовлетворительной коррозионной стойкостью в атмосферных условиях и пресной воде. Из нее можно изготавливать отливки, подверженные ударным нагрузкам.

Сталь ферритного класса (15X25ТЛ) является кислотостойкой и одновременно жаростойкой, предназначена для производства отливок химического машиностроения, не подвергающихся большим механическим нагрузкам. Низкие механические свойства обусловлены крупнозернистой структурой, а повышение концентрации хрома в феррите снижает пластичность последнего.

Стали аустенитного класса (07X18Н9Л, 10X18Н9Л, 12X18Н9ТЛ, 10X18Н11БЛ, 12X18Н12М3ТЛ, 10X17Н10Г4МБЛ) обладают максимальной коррозионной стойкостью. Аустенитная хромоникелевая сталь является кислотостойкой и применяется для изготовления различной арматуры в химической промышленности, коллекторов выхлопных систем, печной арматуры, работающей в среде агрессивных газов, деталей паровых и газовых турбин и т. д. Аустенитная структура стали, содержащей 18 % Cr, получается при введении не менее 8 % Ni. Иногда часть никеля может быть заменена другими, менее дефицитными аустенитизирующими элементами, например, азотом, марганцем.

Предельное равновесное количество углеродов, растворимое в аустените хромоникелевой коррозионно-стойкой стали, составляет 0,02—0,03 %. Избыточный углерод может быть переведен

в твердый раствор при закалке (1000—1050 °С). Для предотвращения выделения карбидов хрома сталь стабилизируют сильными карбидообразующими элементами (Ti, Ta или Nb). Хром в этом случае полностью остается в твердом растворе, а сопротивляемость межкристаллитной коррозии возрастает.

Стали аустенитно-мартенситного класса (08X14H7МЛ, 14X18H4Г4Л) применяются как коррозионно-стойкие для деталей, работающих при нормальных и низких температурах, и рекомендуются для замены стали 10X18H9Л в целях экономии никеля.

Стали аустенитно-ферритного класса (12X25H5ТМФЛ, 16X18H12С4ТЮЛ) имеют структуру, состоящую из зерен феррита, окаймленного аустенитом, что обуславливает высокие прочностные свойства, удовлетворительную пластичность после соответствующей термической обработки. Эти стали, обладающие одновременно кислотостойкостью и жаростойкостью при температурах 600—1000 °С, используют для изготовления деталей химического оборудования, оборудования нефтеперегонных заводов, лопаток компрессоров и других деталей.

Большая часть сталей приведенных марок является одновременно коррозионно-стойкой и жаростойкой. Жаростойкость, как и коррозионная стойкость, определяется главным образом прочностью и плотностью, образуемой на поверхности изделия оксидной пленки.

Гораздо меньше сталей являются жаропрочными, т. е. способны сопротивляться пластической деформации и разрушению при температурах выше 550 °С. Более высокой жаропрочностью обладают сплавы, соответствующие по составу насыщенному твердому раствору, способному к дисперсионному твердению. В результате дисперсионного твердения выделяющиеся по границам зерен мелкие интерметаллические и карбидные фазы замедляют диффузионные процессы и затрудняют сдвиг кристаллов относительно друг друга.

Максимальной жаропрочностью обладают сложнолегированные стали, в которых твердый раствор имеет высокие температуры плавления и рекристаллизации, а дополнительные элементы образуют мелкодисперсные фазы внедрения или вызывают дисперсионное твердение за счет частичного распада твердого раствора.

Выплавка высоколегированных хромистых и хромоникелевых сталей осуществляется в печах с основной футеровкой (преимущественно дуговых и индукционных). В дуговых печах сталь получают как из свежей шихты с окислением, так и методом переплава, а в индукционных печах только вторым методом. Основные технико-экономические проблемы, связанные с подготовкой качественного литейного расплава, заключаются в предупреждении чрезмерного угара хрома и других легирующих элементов; получении в стали возможно низкой концентрации углерода (0,02—0,03 %) при использовании дешевых шихтовых ма-

терналов, рафинировании стали от неметаллических включений и газов. Технологию выплавки стали из свежей шихты с окислением применяют для особо ответственных отливок. По данным Ю. А. Шульте оптимальной является следующая последовательность операций. В завалку вместе с низкоуглеродистым ломом задают руду и известь. После расплавления шихты шлак частично или полностью скачивают и наводят новый. С целью обезуглероживания ванны, дегазации, удаления неметаллических включений в хорошо нагретый металл добавляют руду или продувают его кислородом. После удаления окислительного шлака проводят раскисление ферросилицием, силикохромом, алюминием, наводят восстановительный шлак и в два—четыре приема вводят нагретый низкоуглеродистый феррохром. В процессе расплавления феррохрома шлак раскисляют смесями порошков ферросилиция, алюминия и силикокальция. Титан в виде ферротитана вводят в ванну перед выпуском. Губку или металлические отходы титана присаживают в ковш.

Переплавление высоколегированных отходов можно вести как с применением газообразного кислорода, так и без него. Если наличие отходов позволяет получить содержание углерода в ванне по расплавлению на 0,05—0,1 % меньше заданного нижнего предела, то применять кислород не следует (по данным Ф. И. Еднерала). Если состав металла по расплавлению близок к расчетному, то проводят раскисление шлака молотым коксом, ферросилицием и алюминием; легирующие элементы при этом восстанавливаются из оксидов шлака. Чаще применяют технологию, предусматривающую кратковременную продувку ванны газообразным кислородом.

Обезуглероживание высокохромистой ванны базируется на избирательном окислении углерода при высокой температуре в присутствии хрома. Благодаря экзотермическим реакциям продуваемый кислородом металл нагревается значительно быстрее, чем от электрических дуг. Барботажа ванны обеспечивает снижение в стали азота и водорода.

После раскисления силикохромом и ферросилицием состав корректируют присадкой феррохрома и других легирующих элементов, шлак раскисляют порошкообразными смесями алюминия и ферросилиция.

Выплавка экономилегированных азотосодержащих коррозионно-стойких литейных сталей связана с решением по крайней мере двух проблем: обеспечением стабильного усвоения азота и использованием недефицитных, дешевых материалов и методов. Одним из перспективных решений этих проблем является азото-кислородная продувка ванны. Эта технология предусматривает получение в печи полупродукта из легированных отходов и лома, дешевых марок углеродистого феррохрома и его продувку в печи кислородом для снижения концентрации углерода до 0,1 %.

Этот полупродукт, температура которого 1750 °С, сливают в ковш вместе со шлаком и продувают через пористые пробки

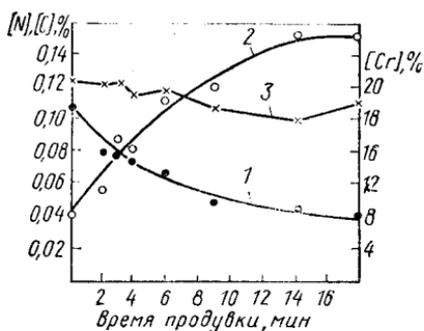


Рис. 97. Изменение содержания углерода (1), азота (2) и хрома (3) во время продувки сплава воздухом

последовательно осушенным воздухом и азотом (рис. 97). После раскисления силико-кальцием сталь переливают в разливочный ковш.

Выплавленная таким образом экономнолегированная никелем азотосодержащая сталь содержала 0,12—0,16 % азота и обладала более высокими технологическими и служебными свойствами, чем сталь 10X18H9ТЛ.

Высоколегированные хромистые и хромоникелевые стали различных марок мало отличаются друг от друга по литейным свойствам, поэтому технологические процессы изготовления отливок имеют много общего. Жидкотекучесть хромистых и хромоникелевых высоколегированных сталей выше, чем углеродистых с соответствующим содержанием углерода. Увеличение жидкотекучести связано с более низкой температурой солидуса (на 50—20 °С) и ликвидуса (на 70—30 °С) легированных сталей по сравнению с углеродистыми сталями. Особенно высокой жидкотекучестью характеризуются экономнолегированные азотосодержащие стали, не стабилизированные титаном. Существенному повышению жидкотекучести способствует продувка стали инертным газом в ковше.

Однако, несмотря на хорошую жидкотекучесть, формы необходимо заливать сталью с большим перегревом и быстро. Увеличение температуры и скорости заливки вызвано склонностью этих сталей к пленообразованию. Наличие плен, состоящих главным образом из оксидов хрома и железа, не только ухудшает условия заполнения полости формы, но может быть причиной резкого снижения качества отливки из-за нарушения ее сплошности и повышенной склонности к пригару. Чтобы предупредить получение плен и включений в отливках со средней толщиной стенок, сталь разливают быстро при 1580—1600 °С. Конструкция литниковой системы, выбор места и способа подвода металла должны обеспечивать его плавное движение, исключать образование встречных потоков.

С целью уменьшения окисления в период заливки и пригара на поверхность формы целесообразно наносить противопопригарные покрытия, облицовочные смеси на основе хромистого железняка, хромомagnesита и циркония, проводить разливку в среде аргона, применять фильтровальные устройства в литниковой системе. Особо следует подчеркнуть недопустимость применения углеродосодержащих крепителей и добавок. В этом случае углеродом насыщается поверхностный слой отливки глубиной ~2 мм, содержание углерода в нем достигает 0,3 %, что резко снижает сопротивление

межкристаллитной коррозии. Повышенная температура заливки вызывает формирование грубой первичной структуры, которую часто невозможно изменить термической обработкой вследствие отсутствия у ряда сталей фазовых превращений. Измельчение первичного зерна достигается дополнительным легированием и модифицированием стали Mg, N, B, Ce, Ti, Zr.

Высокая температура заливаемой стали, пониженная ее теплопроводностью, быстрое заполнение формы способствуют образованию больших (по сравнению с углеродистой сталью) усадочных раковин, что требует увеличения размеров прибылей. В целях уменьшения расхода жидкого металла при производстве отливок из высоколегированных хромистых и хромоникелевых сталей особенно эффективны дополнительный разогрев металла в прибыли, использование повышенного воздушного и газового давления и др. Большая растворимость газов и трудность их удаления из затвердевающей отливки вследствие повышенной вязкости стали часто являются причинами образования в отливках газовых раковин.

Линейная усадка коррозионно-стойких жаростойких и жаропрочных сталей изменяется в широких пределах в зависимости от их структуры. Максимальную усадку имеют стали аустенитного класса, а минимальную — стали мартенситного класса. Низкая теплопроводность, крупнозернистая структура, недостаточная пластичность и прочность при высоких температурах вызывают повышенную склонность сталей, высоколегированных хромом и никелем, к образованию горячих трещин, поэтому литейная форма должна обладать максимально достижимой податливостью. Хромистые стали почти всех классов (по структуре) склонны к образованию холодных трещин. Причиной этого является повышенная хрупкость из-за наличия карбидов, σ -фазы. Значительно меньше опасность образования холодных трещин в хромосодержащих сталях аустенитного класса из-за низкого предела упругости и сравнительно хорошей пластичности. Многие отливки подвергаются различным видам термической обработки, режим которых определяется химическим составом стали и назначением отливки.

§ 4. ОТЛИВКИ ИЗ ХЛАДОСТОЙКОЙ СТАЛИ

Развитие криогенной техники, бурное освоение сырьевой базы в районах Крайнего Севера и Дальнего Востока требовали изготовления машин и различного оборудования, способного надежно и длительно работать при отрицательных температурах. Хладостойкость многих, в том числе и литейных конструкционных сталей недостаточна. Основной причиной, вызывающей снижение пластичности и сопротивления хрупкому разрушению в области отрицательных температур, является загрязненность сплава кислородом, серой, фосфором, рядом цветных металлов. С их присутствием связано образование различной формы неме-

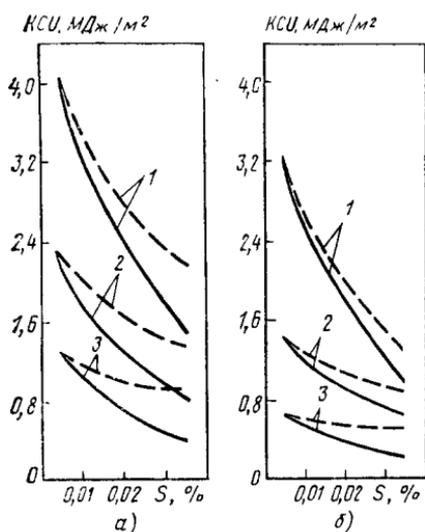


Рис. 98. Влияние серы (сплошные линии) и модифицирования (штриховые линии) на ударную вязкость сталей 10ГЛ (1), 20ГЛ (2), 35ГЛ (3) при температуре 20 (а) и -60°C (б). По данным Ю. А. Шульте

жании серы менее 0,01 %. Следовательно, одним из направлений является глубокая десульфурация стали. Количество оксидных включений и их форма во многом определяются природой раскислителей и технологией проведения этой операции. Применение для окончательного раскисления силикокальция, силикобария, силицидов, РЗМ (33 % РЗМ, 33 % Si, 33 % Fe) позволяет не только снизить общую загрязненность стали неметаллическими включениями, но и придать им более благоприятную округлую форму. Существенное значение имеет строение металлической основы. Мелкозернистая равноосная структура матрицы, получаемая в результате легирования и термической обработки, повышает хладостойкость стали.

Особенностью хладостойких литейных сталей (ГОСТ 21357—75) является низкая допустимая концентрация серы и фосфора (до 0,02 % каждого). Большую часть сталей легируют молибденом (0,1—0,3 %) и ванадием (0,06—0,15 %). Стандарт требует обрабатывать сталь при выплавке комплексными раскислителями и лигатурами РЗМ. Литые детали из хладостойкой износостойкой стали эксплуатируют при температуре до -60°C .

В число сдаточных характеристик наряду с σ_T , σ_B , δ , ψ введена ударная вязкость при -60°C . Не допускаются в отливках неметаллические включения пленочного типа.

таллических включений, снижение межкристаллической прочности.

Многолетняя практика показала, что допустимые стандартом концентрации серы и фосфора ($\sim 0,05$ — $0,04$ % каждого) являются чрезвычайно высокими. По данным Ю. А. Шульте, при уменьшении содержания серы в нелегированной и низколегированной конструкционных сталях от 0,04 до 0,01 % ударная вязкость возрастает в 2—3 раза, снижается порог хладноломкости. Отрицательное влияние серы и фосфора на ударную вязкость низколегированных марганцем литейных сталей с различным содержанием углерода иллюстрируется рис. 98. Установлено, что наибольший рост пластичности и ударной вязкости достигается при содер-

Как следует из изложенного выше, основные особенности производства хладостойких отливок заключаются в выплавке, модифицировании сплавов и термической обработке отливок. Каких-либо существенных изменений технологии изготовления форм и других процессов получения отливок не требуется.

ГЛАВА 11. ОТЛИВКИ ИЗ ЦВЕТНЫХ СПЛАВОВ

§ 1. ОТЛИВКИ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Для изготовления фасонных отливок используют литейные сплавы, которые в зависимости от компонентов, добавляемых к алюминию, подразделяют на пять групп (табл. 20). Основными компонентами (кроме алюминия) в сплавах являются: I группы — кремний, II группы — кремний и медь, III группы — медь, IV группы — магний. В V группу входят сложнелегированные сплавы.

Таблица 20

Химический состав, %, некоторых алюминиевых литейных сплавов
(ГОСТ 2685—75)

Группа сплавов	Марка сплава	Si	Cu	Mg	Mn	Другие элементы
I	АЛ2	10—13	—	—	—	—
	АЛ4	8—10,5	—	0,17—0,3	0,2—0,5	—
	АЛ9	6—8	—	0,2—0,4	—	—
II	АЛ	4,5—5,5	1,5—3	0,35—0,6	0,6—0,9	—
	АК7М2	6—8	1,5—3	0,2—0,6	0,2—0,6	—
	АЛ32	7,5—8,5	1—1,5	0,3—0,5	0,3—0,5	0,1—0,3 Ti
III	АЛ7	—	4—5	—	—	0,15—0,35 Ti
	АЛ19	—	4,5—5,3	—	0,6—1	
IV	АЛ8	—	—	9,3—10	—	—
	АЛ27	—	—	9,5—10,5	—	0,05—0,15 Ti 0,05—0,15 Be 0,05—0,2 Zr
V	АЛ1	—	3,75—4,5	1,25—1,75	—	1,75—2,25 Ni
	АЛ30	11—13	0,8—1,5	0,8—1,3	—	0,8—1,3 Ni
	АК21М2,5Н2,5	20—22	2,2—3	0,2—0,5	0,2—0,4	2,2—2,8 Ni 0,1—0,3 Ti 0,2—0,4 Cr

Примечание. Остальное Al.

Алюминиевые сплавы имеют высокую удельную прочность при нормальной температуре, хорошие литейные свойства, высокую коррозионную стойкость в атмосферных условиях. Наибольшее применение нашли сплавы I и II групп.

Сплавы I группы (силумины) широко используют в авиационной, автомобильной, приборостроительной, машиностроительной, судостроительной и электротехнической промышленности. По содержанию кремния все они, за исключением сплава Al_{12} , являются доэвтектическими, кристаллизуются в узком интервале, имеют небольшую линейную усадку, высокую жидкотекучесть, малую склонность к образованию трещин при затрудненной усадке и рассеянной усадочной пористости. Основными структурными составляющими двойных сплавов алюминия с кремнием являются первичные кристаллы твердого раствора кремния в алюминии (α_{Al}) и двойная эвтектика $\alpha_{Al} + Si$.

Наиболее вредной примесью является железо, образующее с компонентами сплава фазу β ($Al_xFe_ySi_z$), кристаллизующуюся в форме грубых иглообразных кристаллов резко снижающих пластичность. Для нейтрализации вредного влияния железа в сплавы вводят марганец, а для повышения прочности легируют магнием.

При изготовлении толстостенных отливок сплавы первой группы обязательно модифицируют, так как до модифицирования они имеют низкую пластичность, обусловленную грубыми выделениями эвтектического кремния.

Заэвтектические сплавы (14—22 % кремния) отличаются жаропрочностью и имеют небольшой коэффициент термического расширения. Основными структурными составляющими этих сплавов являются кристаллы первичного кремния и эвтектика $\alpha_{Al} + Si$. Заэвтектические сплавы также подвергают модифицированию.

Сплавы II группы широко используют для изготовления отливок повышенной прочности и твердости, сохраняющих постоянство размеров в процессе эксплуатации: корпусов приборов, автомобильных и тракторных поршней, деталей двигателей воздушного охлаждения. Сплавы этой группы более жаропрочны, чем силумины; обладают хорошей жидкотекучестью, малой линейной усадкой, но более склонны к образованию усадочной пористости и трещин при затрудненной усадке, чем сплавы первой группы. Основными структурными составляющими сплавов являются первичные кристаллы твердого раствора α_{Al} , двойная эвтектика $\alpha_{Al} + Si$ и тройная эвтектика $\alpha_{Al} + Si + CuAl_2$. Кроме того, в зависимости от содержания примеси железа, в структуре могут присутствовать компактные ($Al_xMn_yFe_zSi_p$) или игольчатые ($Al_xFe_ySi_z$) кристаллы железистой составляющей.

Сплавы III группы отличаются высокими механическими свойствами, но более низкой коррозионной стойкостью, хорошо обрабатываются резанием. Обладают широким интервалом кристаллизации, сплавы системы алюминий—медь склонны к образованию усадочных трещин и рассеянной усадочной пористости; они менее жидкотекучи, чем сплавы первой и второй групп. Основными структурными составляющими этих сплавов являются твердый раствор меди в алюминии (α_{Al}), эвтектика $\alpha_{Al} + CuAl_2$, а также железистая составляющая ($Al_xMn_yFe_zSi_p$). Для измельчения зерна и повышения механических свойств сплавы легируют марганцем, титаном или цирконием. Сплавы III группы упрочняют термической обработкой.

Сплавы IV группы отличаются низкой плотностью, высокими прочностными свойствами и коррозионной стойкостью, их используют для изготовления отливок, испытывающих вибрационные нагрузки. Эти сплавы имеют низкие литейные свойства: повышенную склонность к окислению и образованию усадочных трещин и рыхлот, низкую жидкотекучесть, а также взаимодействуют с влагой литейных форм. Основными структурными составляющими являются твердый раствор магния в алюминии (α_{Al}) и двойная эвтектика $\alpha_{Al} + Al_8Mg_5$. Для повышения механических свойств и снижения газовой выделенности при кристаллизации эти сплавы легируют цирконием, а для предохранения от загорания — бериллием.

Сплавы V группы применяют для изготовления отливок с повышенной стабильностью размеров, работающих при повышенных температурах и давлениях, а также для изготовления сварных конструкций. Они имеют слож-

ную многофазную структуру, определяющую их высокую склонность к горячим трещинам. Основными структурными составляющими являются фазы S (Al_2CuMg_2), $Al_3(Ni, Cu)_2$ и T (Al_3Cu_3Ni). Кроме того, всегда присутствуют кристаллы железистой составляющей.

Особенности плавки и литья. При плавке на воздухе алюминиевые сплавы окисляются и насыщаются водородом. По мере окисления на их поверхности образуется оксидная пленка. При достижении толщины пленки 0,2 мкм скорость окисления резко снижается из-за малой скорости диффузии кислорода через пленку. Щелочные и щелочно-земельные металлы (натрий, литий, барий, кальций, стронций) и цинк увеличивают окисляемость сплавов в результате образования рыхлых оксидных пленок. Бериллий (до 0,01 %) снижает скорость окисления, большая же часть легирующих элементов (Mn, Cu, Si и др.) не оказывает существенного влияния. В процессе плавки оксидные пленки разрушаются, их обрывки замешиваются в расплаве, а попадая в отливки, ослабляют их сечения, снижают пластичность.

Алюминиевые сплавы растворяют до 3 см³ водорода на 100 г расплава. Большая относительная разность растворимости водорода в жидких и твердых алюминиевых сплавах является их специфической особенностью, определяющей большую склонность к образованию в отливках газовых раковин и пористости. Щелочные и щелочно-земельные металлы увеличивают растворимость водорода в сплавах.

Проведение плавки под флюсами предохраняет алюминиевые расплавы от окисления и насыщения водородом. Для сплавов, содержащих не более 1 % магния, в качестве покровного флюса применяют смесь хлоридов натрия и калия (55 %) в количестве 1—2 % от массы шихты. Для алюминиево-магниевых сплавов, содержащих более 1 % магния, в качестве флюса используют карналлит ($MgCl_2 \times KCl$) и смесь карналлита с 10—15 % фторида кальция или магния. В тех случаях, когда применение флюса невозможно, защиту этих сплавов от окисления осуществляют введением 0,01—0,05 % бериллия. В последние годы для этой цели успешно применяют газовые смеси, например воздух с 0,1 % шестифтористой серы (SF_6).

Из газов печной атмосферы для алюминиевых сплавов наиболее опасны пары воды. Взаимодействие их с алюминием приводит к загрязнению расплавов оксидными пленками и насыщению водородом: $2Al + 3H_2O \rightarrow Al_2O_3 + 6H$. В целях предотвращения такого взаимодействия принимают ряд мер для удаления влаги: сушат шихтовые материалы, прокаливают футеровку печей и разливочных ковшей, окрашивают плавильный инструмент, сушат и переплавляют флюсы. Однако полностью предотвратить окисление и взаимодействие с водяными парами не удастся, и расплавы в той или иной степени оказываются загрязненными оксидными включениями и водородом, поэтому перед заливкой в формы требуют очистки.

Рафинирование алюминиевых расплавов от взвешенных неметаллических включений и водорода осуществляют продувкой инертными (аргон, азот) и активными (хлор, смесь азота с 10 % хлора) газами, обработкой хлоридами ($MnCl_2$, $ZnCl_2$, $TiCl_4$, C_2Cl_6), флюсами, выдержкой в вакууме и фильтрованием через зернистые или спеченные фильтры.

Технология продувки состоит в пропускании газов через пористые вставки из спеченного глинозема для получения газовых пузырьков диаметром 1,5—2 мм. Продувку азотом проводят при 720—730 °С в течение 5—20 мин (в зависимости от объема расплава) с расходом газа 0,5—1 м³ на тонну расплава. Рафинирование смесью азота с хлором проводят при 710—720 °С в течение 10—12 мин с расходом газа 0,5—0,8 м³ на тонну расплава.

При рафинировании хлоридами последние вводят в расплав в количестве 0,1—0,3 % при температуре 720—750 °С. Взаимодействие хлоридов с алюминием сопровождается образованием хлористого алюминия, пары которого действуют так же, как азот или аргон. Для удаления мелких пузырьков рафинирующих газов расплавы после рафинирования отстаивают в течение 10—15 мин.

Рафинирование флюсом осуществляют при 730—750 °С, расход флюса 0,5—1 % от массы расплава. Перед использованием флюс переплавляют для удаления кристаллизационной влаги. Обезвоженный флюс насыпают на поверхность рас-

плава или вводят в расплав, который энергично перемешивают. В некоторых случаях рафинирование проводят в ковшах. Для этого флюс заливают на дно ковша, а затем ковш заполняют металлом. При этом происходит интенсивное замешивание флюса в расплав и удаление неметаллических включений.

Вакуумирование алюминиевых расплавов ведут при остаточном давлении 6,6—13,3 кПа в течение 15—20 мин.

Эффективным способом очистки от неметаллических включений и плен является фильтрование расплавов через сетчатые, зернистые или пористые керамические фильтры. Сетчатые фильтры, изготовленные из стеклоткани с размером ячейки от $0,5 \times 0,5$ до $1,5 \times 1,5$ мм или титана, установленные в литниковых чашах, под стояками или в шлакоуловителях, позволяют в 1,5—2 раза снизить количество попавших в отливку включений и плен, размер которых больше размера ячейки сетки.

Значительно больший эффект очистки дают зернистые фильтры, представляющие собой слой (толщиной 100—150 мм) зерен фильтрующего материала диаметром 5—10 мм. Такие фильтры изготовляют из магнезита, графита, сплавов хлоридов и фторидов, алунда и других материалов. Очистка расплавов фильтрованием через зернистые фильтры обусловлена механическим и адгезионным процессами. Первому из них принадлежит решающая роль при отделении крупных включений и плен, второму — при отделении тонкодисперсных включений. Эффективность очистки зависит от природы материала, размера зерна, толщины слоя фильтра и металлостатического напора, определяющего скорость фильтрации. При оптимальных условиях фильтрования зернистые фильтры работают в 2—4 раза более эффективно, чем сетчатые.

Керамические фильтры с диаметром пор 150—200 мкм обеспечивают эффективное удаление неметаллических включений размером более 10 мкм.

Эффективность операций рафинирования перечисленными способами контролируют с помощью технологических проб, химического и газового анализа.

Алюминиевые сплавы модифицируют с целью измельчения макрозерен, первично кристаллизующихся фаз и фаз, входящих в эвтектики, и изменения формы выделения хрупких фаз. Для измельчения макрозерен в расплавы вводят титан, цирконий, бор, ванадий, титан совместно с бором. Эти модификаторы образуют с алюминием интерметаллиды, являющиеся центрами кристаллизации твердых растворов на основе алюминия. Измельчение макрозерен отливок повышает однородность их механических свойств в различных по толщине сечениях и увеличивает относительное удлинение.

Силумины подвергают модифицированию с целью измельчения кристаллов эвтектического кремния. Для этого в доэвтектические сплавы, содержащие не менее 6 % кремния, вводят 0,05—0,1 % натрия или стронция. Введение натрия осуществляют смесью хлористого и фтористого натрия (33 % NaCl, 67 % NaF) при температуре 800—820 °С или тройным модификатором (25 % NaF, 62,5 % NaCl, 12,5 % KCl) при температуре 720—740 °С. В некоторых случаях модифицирование совмещают с рафинированием, используя для этой цели универсальный флюс (40 % NaF, 45 % NaCl, 15 % Na_3AlF_6). При модифицировании солями их навеску (1—2 %) засыпают на поверхность расплава и выдерживают в течение 10—15 мин для того, чтобы с достаточной полнотой прошла реакция: $6\text{NaF} + \text{Al} \rightarrow \text{Na}_3\text{AlF}_6 + 3\text{Na}$. После этого соли замешивают в расплав и через 3—5 мин удаляют вместе со шлаком. Эффект модифицирования натрием сохраняется в течение 20—30 мин. Модифицирующее действие стронция, который вводят в расплав лигатурой алюминий—стронций (10 % Sr), при температуре 750—780 °С сохраняется более 3 ч.

Завтектические силумины модифицируют с целью измельчения первичных кристаллов кремния. В качестве модификатора используют фосфор, который вводят в расплавы в количестве 0,05—0,1 % лигатурой медь—фосфор или смесью красного фосфора (20 %) с фторцирконатом калия (K_2ZrF_6) (10 %) и хлористым калием (70 %) при 790—825 °С.

Для изменения формы выделения кристаллов железистой составляющей (получение компактных, округлых кристаллов вместо иглообразных, резко снижающих пластические свойства) в алюминиевые сплавы вводят 0,3—0,4 % марганца или бериллия.

Тщательно очищенный расплав может быть вновь загрязнен в процессе заливки форм. Падение струи металла с высоты более 300 мм вызывает вспенивание и образование оксидов, часть которых попадает в отливку. Для алюминиевых сплавов недопустимо образование завихрений в местах удара струи о стенку формы. Воздух, захваченный вихревыми потоками, окисляет расплав. В связи с этим применяют расширяющиеся литниковые системы, обеспечивающие отделение неметаллических включений и минимально допустимую линейную скорость движения струи расплава на выходе из питателей. Очень часто в шлакоуловителях устанавливают сетки (из стеклоткани, титана, стержневой смеси), усложняют литниковые системы различными поворотами, используют зернистые фильтры.

Для предотвращения захвата воздуха при заполнении высоких форм (>300 мм) применяют многорусные и щелевые литниковые системы, позволяющие к тому же получать наиболее благоприятное распределение температуры по высоте отливки.

Алюминиевые сплавы склонны к образованию усадочной пористости, устранение которой в отливках достигают установкой массивных прибылей, холодильников, а для ответственных отливок — кристаллизацией под давлением сжатого воздуха в автоклавах.

Отливки из алюминиевых сплавов изготовляют всеми известными способами литья. Около 80 % отливок получают литьем в металлические формы (в кокиль, под давлением, под низким давлением), остальные 20 % — литьем в формы однократного использования (песчаные, оболочковые и др.). Для изготовления песчаных форм и стержней используют мелкозернистые пески. В состав формовочных смесей вводят до 95 % возврата. При изготовлении отливок из алюминийсодержащих сплавов в состав формовочных смесей вводят присадку ВМ (на основе технической мочевины) или борную кислоту, которые предохраняют расплавы от загорания в форме.

Очищают отливки на гидropескоструйных установках. В зависимости от состава сплава отливки проходят термическую обработку по определенным режимам.

§ 2. ОТЛИВКИ ИЗ МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Для изготовления фасонных отливок используют три группы магниевых сплавов: сплавы магния с алюминием и цинком, сплавы магния с цинком и цирконием, сплавы магния, легированные РЗМ (табл. 21).

Сплавы 1-й группы предназначены для производства высоконагруженных отливок, работающих в атмосфере с большой влажностью. Для повышения коррозионной стойкости в сплавы вводят 0,1—0,5 % марганца, а для снижения окисляемости 0,001—0,002 % бериллия или 0,5—0,1 % кальция. Сплавы этой группы относят к числу высокопрочных. Основным упрочнителем в них является алюминий, растворимость которого в магнии при эвтектической температуре составляет 17,4 %, а при нормальной — 2,8 %. Цинк также упрочняет магний, но менее эффективно, чем алюминий.

Основными структурными составляющими сплавов этой группы являются первичные кристаллы α_{Mg} твердого раствора алюминия и цинка в магнии, фазы $\gamma (Mg_{17}Al_{12})$, $\eta (Mn, Al)$ и марганцевая фаза. Фаза γ является упрочнителем сплавов при термической обработке.

Сплавы 2-й группы также относят к числу высокопрочных. Они отличаются от магниевых сплавов других групп повышенными механическими свойствами и хорошей обрабатываемостью резанием. Легирование их лантаном улучшает литейные свойства, несколько повышает жаропрочность и свариваемость, но снижает прочность и пластичность при нормальной температуре. Эти сплавы обладают удовлетворительными литейными свойствами, имеют измеленные цирконием зерна, способны упрочняться при термической обработке. Из них можно получать отливки с однородными свойствами в различных по толщине сечениях. Их используют для изготовления отливок, работающих при 200—250 °С и высоких нагрузках. Основными структурными составляющими являются твердый раствор цинка и циркония в магнии (α_{Mg}) и включения интерметаллидов Mg_2Zn_3 и $ZrZn_2$, являющихся упрочнителями при термической обработке.

Химический состав, %, некоторых магниевых литейных сплавов
(ГОСТ 2856—79)

Группа сплавов	Марка сплава	Al	Mn	Zn	Zr	Другие элементы
1	МЛ3	2,5—3,5	0,15—0,5	0,5—1,5	—	—
	МЛ4	5—7	0,15—0,5	2—3,5	—	—
	МЛ5	7,5—9	0,15—0,5	0,2—0,8	—	—
	МЛ6	9—10,2	0,1—0,5	0,6—1,2	—	—
2	МЛ8	—	—	5,5—6,6	0,7—1,1	0,2—0,8 Cd
	МЛ12	—	—	4—5	0,6—1,1	—
3	МЛ9	—	—	—	0,4—1	0,2—0,8 In, 1,9—2,5 Nd
	МЛ19	—	—	0,1—0,6	0,4—1	1,4—2,2 Y, 1,6—2,3 Nd

П р и м е ч а н и е. Остальное Мг.

Сплавы 3-й группы обладают высокой жаропрочностью и хорошей коррозионной стойкостью. Они предназначены для длительной работы при 250—350 °С и кратковременной при 400 °С. Эти сплавы имеют хорошие литейные свойства, высокую герметичность, малую склонность к образованию микрорыхлот и усадочных трещин, высокие и однородные механические свойства в сечениях различной толщины. Сплавы с редкоземельными элементами применяют для изготовления отливок, работающих под воздействием статических и усталостных нагрузок. Основными их структурными составляющими являются твердый раствор неодима и циркония в магнии и включения фаз Mg_2Nd , Mg_3Nd , Mg_5Zr .

Для изготовления отливок чаще используют сплавы первой группы. Лучшими литейными свойствами обладают сплавы МЛ5 и МЛ6.

Особенности плавки и литья. Плавка магниевых сплавов сопряжена с рядом трудностей, связанных прежде всего с их легкой окисляемостью. На поверхности магниевых расплавов, в отличие от алюминиевых, образуется рыхлая пленка оксида, не предохраняющая металл от дальнейшего окисления. При незначительном перегреве магниевые расплавы легко воспламеняются. В процессе плавки магний и его сплавы взаимодействуют с азотом, образуя нитриды, и интенсивно поглощают водород (до 30 см³ на 100 г расплава). Оксиды и нитриды, находясь во взвешенном состоянии, обуславливают снижение механических свойств сплава и образование микропористости в отливках.

Для предотвращения интенсивного взаимодействия с печными газами плавку магниевых сплавов ведут под флюсами или в среде защитных газов. При плавке большей части магниевых сплавов применяют флюс ВИ2 (40—48 % $MgCl_2$, 30—40 % KCl , 5 % $BaCl_2$, 3—5 % CaF_2) и ВИ3 (33—40 % $MgCl_2$, 25—36 % KCl , 15—20 % CaF_2 , 7—10 % MgO), основой которых является карналлит. Покровные флюсы для сплавов с редкоземельными элементами не должны содержать хлористый магний (22—26 % KCl , 17—20 % $NaCl$, 35—39 % $CaCl_2$, 19—23 % $BaCl_2$, 2—5 % CaF_2), так как он взаимодействует с РЗМ с образованием хлоридов, увеличивая их потери до 20 %.

Применение флюсов вызывает ряд нежелательных явлений. Попадание флюса в тело отливки приводит к образованию очагов интенсивной коррозии из-за их высокой гигроскопичности; существенно ухудшаются условия труда. Поэтому в настоящее время широко применяют безфлюсовую плавку, используя для за-

пцнты магниевых расплавов газозые смеси (воздух с шестифтористой серой или фторидом бора, углекислый газ и др.). В производственных условиях чаще всего используют смесь воздуха с 0,1 % шестифтористой серы.

В зависимости от масштаба производства и массы отливок применяют три способа плавки литейных магниевых сплавов: в стационарных тиглях, выемных тиглях и дуплекс-процессом (в индукционной печи-тигле). Плавку в стационарных тиглях ведут при массовом или крупносерийном производстве мелких отливок. Сплавы в этом случае расплавляют под флюсом ВИ2 в толстостенных стальных тиглях. После рафинирования и модифицирования расплавы отстаивают в течение 10—15 мин при температуре 700—720 °С, а затем небольшими ковшами разливают по формам. Остаток металла (25—30 % объема расплава в тигле), загрязненный неметаллическими включениями и флюсом, после каждой плавки сливают и подвергают переплавке и рафинированию.

При изготовлении крупных отливок плавку ведут в выемных сварных стальных тиглях чайничкового типа под флюсом ВИ3. Этот флюс имеет меньшую плотность, чем флюс ВИ2, поэтому всплывает на поверхность расплава и во время заливки форм удерживается в тигле перегородкой. Для заполнения форм используют 2/3 объема расплава; 1/3 объема, загрязненного флюсом и неметаллическими включениями, направляют на переплав и рафинирование.

При дуплекс-процессе после расплавления в индукционных тигельных печах под флюсом расплав переливают в выемные тигли, в которых осуществляют рафинирование и модифицирование.

Выплавка большей части магниевых сплавов начинается с загрузки и расплавления покровного флюса (около 10 % от массы шихты), затем загружается и расплавляется магний или подготовительный сплав, в который добавляются легирующие компоненты (Mn, Zn, Zr и PЗМ). Марганец вводят в виде хлористого марганца при 850 °С, цирконий в виде фторцирконата калия или лигатуры магний — цирконий. PЗМ вводят в чистом виде или мишметаллом.

Для очистки от неметаллических включений магниевые расплавы фильтруют через зернистые фильтры из магнезита или графита, обрабатывают флюсом ВИ2 или ВИ3 или продувают газами (аргоном при 720—760 °С). Для связывания водорода в устойчивые гидриды в расплавы перед разливкой вводят до 0,1 % кальция.

Для измельчения зерна и повышения механических свойств магниевые сплавы, содержащие алюминий, подвергают модифицированию углеродсодержащими веществами (мелом, гексахлорэтаном, магнезитом, мрамором и др.) или перегревом. Перед модифицированием для предохранения от загорания в расплавы вводят 0,001—0,002 % бериллия.

При модифицировании перегревом расплав нагревают в стальном тигле до 900 °С, выдерживают при этой температуре 15—20 мин, а затем быстро охлаждают до температуры заливки. В процессе перегрева магниевые расплавы растворяют некоторое количество железа из стального тигля. При последующем быстром охлаждении железо выделяется в виде дисперсных частиц $FeAl_3$, которые служат центрами кристаллизации для твердого раствора алюминия в магнии (α_{Mg}).

Более стабильные результаты достигают модифицированием углеродсодержащими веществами (0,3—0,6 % от массы расплава). При 720—780 °С модификаторы разлагаются с выделением углекислого газа, из которого магний восстанавливает углерод. В результате последующего взаимодействия с алюминием образуются тонкодисперсные карбиды алюминия (Al_4C_3), являющиеся центрами кристаллизации для α_{Mg} -твердого раствора.

Для измельчения зерен сплавов, не содержащих алюминия, в расплав вводят присадки циркония (0,5—0,7 %) или кальция (0,05—0,15 %).

При заливке форм предусматривают меры, предотвращающие попадание шлака и флюса в отливки, захват воздуха и окисление расплава. Для этого применяют литниковые чаши с пробками, вмещающие от 30 до 100 % слыва, потребного для заполнения формы, устанавливают металлические сетки и зернистые фильтры. Эффективной мерой предотвращения попадания флюса в отливки является применение фильтров из магнезита, хорошо впитывающих хлориды.

Расширяющиеся литниково-питающие системы с тонкими ленточными стояками, щелевыми и многоярусными питателями, массивные прибыли (30—50 %

от массы отливки) должны обеспечить плавный подвод металла и рациональное питание отливки в процессе затвердевания.

Около 80 % отливок из магниевых сплавов изготавливают в металлических формах (в кокилях и под давлением) и около 20 % в песчаных формах. Песчаные формы и стержни изготавливают из мелкозернистых песков.

Отличительной особенностью формовочных и стержневых смесей для этой группы сплавов является введение в их состав серы, буры, борной кислоты, технической мочевины и других веществ, предотвращающих взаимодействие расплава с материалом форм и стержней.

При заливке форм струю металла обязательно припудривают молотой серой, что предохраняет расплав от загорания. При изготовлении высоких отливок (высотой более 500 мм) широко используют метод литья с последовательной направленной кристаллизацией, предусматривающий подачу расплава в форму под уровень расплава через стальные подогреваемые трубки диаметром 10—12 мм и опускание формы с заданной скоростью. Трубки при этом остаются в исходном положении, нижний конец их все время находится под уровнем расплава.

Отличительной особенностью технологии является химическая обработка отливок перед их термической обработкой и сдачей на склад с целью получения плотного защитного слоя оксида на поверхности. В процессе химической обработки отливки обезжиривают в щелочном растворе, промывают в холодной воде, выдерживают в растворе хромового ангидрида для удаления остатков солей и флюсов, вновь промывают в воде, окисляют в растворе двуххромовокислого калия с азотной кислотой и хлористым аммонием для получения оксидной пленки, промывают и высушивают. После этого отливки подвергают термической обработке в атмосфере сернистого газа с принудительной циркуляцией.

Технология обрубки, пропитки и контроля отливок из магниевых сплавов аналогична технологии обработки отливок из алюминиевых сплавов.

§ 3. ОТЛИВКИ ИЗ МЕДНЫХ СПЛАВОВ

Для изготовления отливок используют оловянные и безоловянные бронзы, латуни (табл. 22).

Медные сплавы наряду с достаточной прочностью имеют высокие антифрикционные свойства, хорошо противостоят коррозии в морской воде, паре и других средах, сохраняют высокую пластичность при низкой температуре. Они немагнитны, легко полируются и обрабатываются резанием.

Оловянные бронзы широко применяют для изготовления арматуры, подшипников, шестерен, втулок, работающих в условиях трения, повышенного давления воды и водяного пара. Хорошая жидкотекучесть бронз позволяет литьем в песчаные формы получать сложные по конфигурации отливки. Характерной особенностью сплавов этой группы является широкий интервал кристаллизации (150—200 °С), что обуславливает значительные трудности получения плотных отливок.

Бронзы с высоким содержанием олова (БрО10Ф1, БрО10Ц2), ввиду его высокой стоимости и дефицитности, применяют только для отливок ответственного назначения. Для обычных отливок используют малооловянные бронзы.

Наиболее вредными примесями оловянных бронз являются алюминий и кремний. Сотые доли процента этих элементов снижают механические свойства бронз и способствуют увеличению растворимости водорода.

Легирование бронз цинком повышает литейные свойства и снижает стоимость сплавов. Свинец улучшает антифрикционные свойства оловянных бронз, их обрабатываемость резанием и жидкотекучесть. Фосфор повышает износостойкость и жидкотекучесть.

Безоловянные бронзы по механическим, коррозионным и антифрикционным свойствам превосходят оловянные. Наиболее широкое применение из них нашли алюминиевые бронзы, которые имеют высокую коррозионную стойкость в пресной и морской воде, хорошо противостоят разрушению в условиях кавитации, обладают меньшим, чем оловянные бронзы, антифрикционным износом. Алюминиевые бронзы применяют для изготовления гребных винтов крупных судов,

Содержание легирующих элементов, %, в некоторых медных литейных сплавах

Марка сплава	Sn	Pb	Al	Mn	Zn	Cu	Другие элементы
Оловянные бронзы (ГОСТ 613—79)							
БрО1СФ1	9—11	—	—	—	—	Остальное	0,4—1,1 P
БрО10Ц2	9—11	—	—	—	1—3	То же	—
БрО5Ц5С5	4—6	4—6	—	—	4—6	»	—
БрО3Ц12С5	2—3,5	3—6	—	—	8—15	»	—
Безоловянные бронзы (ГОСТ 493—79)							
БрА9Мц2Л	—	—	8—9,5	1,5—2,5	—	»	—
БрА9Ж3Л	—	—	8—10,5	—	—	»	2—4 Fe
БрА10Ж3Мц2	—	—	9—11	1—3	—	»	2—4 Fe
БрС30	—	27—31	—	—	—	»	—
Латуни (ГОСТ 17711—80)							
ЛЦ40С	—	0,8—2	—	—	Остальное	57—61	—
ЛЦ40Мц1,5	—	—	—	1—2	То же	57—60	—
ЛЦ30А3	—	—	2—3	—	»	66—68	—
ЛЦ16К4	—	—	—	—	»	78—81	3—4,5 Si

зубчатых колес, корпусов насосов и других отливок. Механические, технологические и эксплуатационные свойства этих сплавов улучшают легированием железом, марганцем и никелем. Железо и марганец устраняют склонность алюминиевых бронз к образованию крупнозернистой структуры, повышают механические свойства. Никель улучшает износостойкость и коррозионные свойства бронз. В процессе выплавки алюминиевые бронзы склонны к окислению, сопровождающемуся загрязнением расплава твердыми, трудно удаляемыми дисперсными оксидами Al_2O_3 .

Свинцовые бронзы (БрС30) обладают хорошими антифрикционными свойствами при больших удельных нагрузках и высоких скоростях скольжения, поэтому их используют как заменители оловянной бронзы при изготовлении вкладышей подшипников. Особенностью свинцовых бронз является предрасположенность к ликвации свинца. Дисперсное распределение свинца может быть достигнуто только при больших скоростях кристаллизации.

Латуни. Фасонные отливки изготовляют преимущественно из сложнoleгированных латуней, двойные латуни используют сравнительно редко. Легирование двойных латуней алюминием или кремнием повышает жидкотекучесть, коррозионную стойкость, механические свойства сплавов и уменьшает угар цинка при плавке. Вместе с тем алюминий и кремний повышают склонность латуней к газонасыщению и образованию пористости. Железо и марганец улучшают механические свойства латуней, но снижают жидкотекучесть. Олово, улучшая механические свойства, не оказывает влияния на их литейные свойства.

Кремнистая латунь ЛЦ16К4 обладает высокой жидкотекучестью, хорошо обрабатывается резанием и сваривается. Ее применяют для изготовления арматуры, испытывающей повышенное воздушное и гидравлическое давление, работающей в агрессивных средах (морской воде, серной кислоте и т. д.). Эта латунь имеет недостаточную пластичность при высокой температуре, склонна к образованию трещин при затрудненной усадке. Примеси алюминия и олова снижают

жидкотекучесть кремнистой латуни и увеличивают склонность к поглощению водорода и образованию газовой пористости.

Алюминиевые латуни, обладающие хорошей коррозионной стойкостью в морской воде, широко применяют в судостроении. Марганцевые латуни применяют для изготовления жаростойких и коррозионно-стойких отливок, легирование оловом повышает их коррозионную стойкость в морской воде. Свинцовую латунь используют как антифрикционный материал.

Особенности плавки медных сплавов. Плавку медных сплавов ведут в тигельных и шахтных индукционных и отражательных печах, футерованных шамотом или кварцем. При плавке на воздухе медные сплавы окисляются и насыщаются водородом. Окисляются в первую очередь компоненты, имеющие более высокий, чем медь, изобарный потенциал образования оксида. По этой причине легирующие элементы (Al, Be, Sn, Zn и др.) раскисляют медь, образуя твердые, жидкие и газообразные оксиды. Твердые оксиды медленно всплывают (осаждаются) в расплавах. Они могут попасть в отливки.

Медные сплавы, за исключением латуней, интенсивно поглощают водород и при кристаллизации склонны к образованию газовой пористости. В большей мере этому подвержены сплавы с широким интервалом кристаллизации. В зависимости от состава бронз и условий их плавки растворимость водорода в них может достигать 20 см³ на 100 г сплава. С повышением температуры интенсивность взаимодействия с газами увеличивается; взаимодействию с газами наиболее подвержены алюминиевые и кремниевые бронзы и латуни.

Для защиты от окисления плавку медных сплавов ведут под покровом древесного угля или флюсов на основе фторидов, стекла или соды. Чтобы предупредить образование твердых нерастворимых оксидов, медь перед введением легирующих элементов раскисляют 0,1—0,15 % фосфора.

Для очистки расплавов от растворенного водорода и твердых неметаллических включений их подвергают продувке газами, вакуумированию, обработке флюсами и фильтрованию. Наиболее глубокую очистку расплавов дает фильтрование через зернистые фильтры из фторидов кальция и магния. Фильтры перед использованием подогревают до 700—800 °С.

Медные сплавы модифицируют с целью измельчения зерен и нейтрализации вредных примесей. Для измельчения зерна в сплавы вводят 0,15—0,2 % тугоплавких элементов (Ti, V, Zr, B, W, Mo). Для нейтрализации вредного влияния примесей висмута, сурьмы, мышьяка и свинца в двойные латуни вводят до 0,2 % кальция, до 0,3 % церия или 0,4 % циркония.

Технология изготовления фасонных отливок во многом определяется интервалом кристаллизации сплавов и их склонностью к окислению в процессе заполнения литейных форм. Для сплавов с узким интервалом кристаллизации (латуни ЛЦ40С, алюминиевых бронз и латуней) характерно образование сосредоточенных усадочных раковин и почти полное отсутствие пористости. Изготовление отливок из таких сплавов требует установки в тепловых узлах массивных прибылей. Сплавы с широким интервалом кристаллизации (оловянные бронзы, медно-никелевые сплавы, кремнистые бронзы и др.) склонны к образованию рассеянной газоусадочной пористости, предотвратить появление которой с помощью прибылей затруднительно. Поэтому отливки из этих сплавов изготавливают с малыми по объему прибылями или без них.

Алюминиевые бронзы и другие сплавы с легкоокисляющимися компонентами заливают через расширяющиеся литниковые системы, предназначенные для отделения оксидных плен и обеспечения минимально допустимой скорости течения металла на выходе из питателей. Как правило, используют расширяющиеся литниковые системы с нижним или сифонным подводом металла; предусматривают устройство центробежных шлакоуловителей, установку сеток и зернистых фильтров. Более простые литниковые системы применяют при литье оловянных бронз.

При медленном охлаждении медные сплавы (кроме кремнистых бронз и латуней и оловянных бронз с высоким содержанием олова) не склонны к образованию горячих трещин. При резком охлаждении трещинообразованию более подвержены сплавы с широким интервалом кристаллизации. По этой причине их почти не применяют для литья в кокиль и под давлением.

Для создания направленной кристаллизации при литье в разовые формы широко используют холодильники. Разовые формы изготавливают из мелкозернистых смесей с высоким содержанием глины (до 12 %). В целях борьбы с пригаром в смеси для форм вводят до 2 % мазута. Для этой же цели на рабочую поверхность высушенных форм наносят графитовые покрытия. Мелкие и сложные отливки из медных сплавов получают в оболочковых формах и литьем по выплавляемым моделям.

§ 4. ОТЛИВКИ ИЗ НИКЕЛЕВЫХ СПЛАВОВ

Никель по своим свойствам близок к железу и кобальту и относится к элементам, являющимся основой современных жаропрочных и коррозионно-стойких сплавов, применяемых в космической, авиационной технике, химической промышленности и других отраслях народного хозяйства. Никель кристаллизуется в гранцентрированной кубической (ГЦК) решетке с периодом 0,3524 нм; его плотность равна $8,9 \cdot 10^3$ кг/м³. Технически чистый никель нетоксичен, не разрушает витамины, поэтому широко используется для изготовления деталей оборудования пищевой промышленности. Для фасонного литья используют никель с добавкой следующих элементов, %: 1—2 Si, 1—1,5 Mn, $\leq 0,3$ C, $\leq 0,03$ S, 0,08—0,1 Mg, ≤ 1 Fe, $\leq 0,3$ Cu. Свойства этих сплавов, полученные на образцах, залитых при температуре 1500—1600 °С в песчано-глинистые формы, таковы: временное сопротивление 372—431 мПа, относительное удлинение 10—30 %, твердость по Бринеллю 980—1225 НВ, линейная усадка 1,95%.

Никелевые отливки магнитны. Прочность и твердость значительно повышаются с понижением температуры ниже 0 °С без заметного снижения пластичности и ударной вязкости. Такое изменение свойств никеля выгодно отличает его от других элементов и является предпосылкой широкого использования в качестве основы сплавов для отливок самого различного назначения.

Сплавы никель—медь (монель-металл) и никель—медь—кремний применяют для отливок клапанов, седел клапанов, корпусов насосов, втулок, кранов, работающих в воде, нефти и других химических средах. Сплавы никель—медь—олово, никель—медь—олово—свинец относят к бронзам. Их используют для изготовления литых втулок и седел паровых клапанов, корпусов центробежных насосов, коррозионно-стойких подшипников и т. д. Сплавы характеризуются высокими антифрикционными свойствами и стабильностью механических свойств при повышенной температуре (до 500 °С).

Сплавы систем никель—хром, никель—хром—железо являются жаростойкими, из них изготавливают сопловые лопатки и другие отливки, работающие при температуре до 800 °С. Как правило, сплавы однофазны, их структура состоит из легированного γ -твердого раствора. За рубежом сплавы системы Ni—Cr—Fe называют инконелями. Типичным представителем таких сплавов является сплав ЭИ-418 (75-15-7). Легирование этих сплавов алюминием и титаном приводит к выделению из γ -твердого раствора интерметаллида типа Ni₃(Al, Ti), присутствие которого в структуре повышает уровень прочностных свойств, но одновременно снижает пластичность. Сплавы никеля с алюминием обладают высокой плотностью, прочностью и коррозионной стойкостью при повышенных температурах. В структуре этих сплавов формируются вторые фазы NiAl, Ni₃Al. Модифицирование бором, углеродом, кальцием, титаном, литием, РЗМ значительно улучшает все свойства сплавов. Сплавы никель—кремний хорошо сопротивляются износу, коррозии и широко используются в химическом машиностроении. Они устойчивы во многих кислотах, аммиаке и других агрессивных средах. Сплавы никель—бериллий используют для отливок, работающих при высоких температурах в коррозионной среде. Сплавы отличаются хорошими литейными свойствами, позволяющими получать сложные по конфигурации отливки любым из известных в настоящее время методов литья.

Сложнолегированные сплавы на основе никеля используют для изготовления отливок, работающих при высоких температурах и нагрузках в агрессивных средах.

Сплавы можно разбить на следующие группы: жаростойкие, жаропрочные, коррозионно-стойкие и с особыми физическими свойствами. Наиболее важной

группой является группа жаропрочных сплавов. Высокие свойства никелевых сплавов достигаются упрочнением γ -твердого раствора и за счет формирования интерметаллидных фаз. Все легирующие элементы по характеру взаимодействия с никелем можно разбить на три группы: элементы (Fe, Cr, Co, Mo, W, в определенной степени Al, Ti, Nb), упрочняющие γ -твердый раствор; элементы (Al, Ti, Nb, Ta), формирующие γ' -фазу, на основе интерметаллида Ni_3Al ; элементы (Mg, В, С, Zr, РЗМ), сегрегирующие по границам зерен. Кроме того, в никелевых сплавах могут формироваться карбиды, бориды и другие соединения.

Первая группа элементов при легировании никеля образует твердый раствор замещения до тех пор, пока период кристаллической решетки не достигнет 0,355—0,358 нм. Дальнейшее легирование элементами первой группы приводит к образованию в структуре сплава интерметаллидных соединений — топологически плотно упакованных фаз, присутствие которых, как правило, снижает механические свойства. Поэтому количество элементов первой группы должно быть таким, чтобы период решетки никелевого твердого раствора не превысил указанных значений. При этом временное сопротивление и предел текучести однофазных сплавов в литом состоянии не превышают соответственно 588 и 294 МПа. Дальнейшее повышение прочностных свойств может быть достигнуто только за счет образования в структуре дисперсионно-твердеющей фазы на основе интерметаллида Ni_3Al , т. е. легированием сплава Al, Ti, Nb, Ta.

С увеличением количества γ' -фазы в структуре сплава резко повышаются прочностные, но снижаются пластические характеристики. Период решетки γ -твердого раствора при легировании изменяется по уравнению

$$a = 0,3522 + 0,0218 \sum_{i=1}^n C_i (R_i - R_{Ni}),$$

где 0,3522 — период решетки чистого никеля; 0,0218 — коэффициент; C_i — концентрация i легирующего элемента; R_i — атомный радиус легирующего элемента; R_{Ni} — атомный радиус никеля.

Легирование никеля γ' -образующими элементами эффективно с того момента, когда период решетки достиг значения примерно 0,358 нм. В этом случае в структуре сплава формируется вторая γ' -фаза. Ее количество может быть подсчитано по эмпирическому уравнению

$$\gamma' = 72 (1 - e^{-54,6\Delta a}),$$

где Δa — изменение периода решетки при легировании никеля γ' -образующими элементами, если бы они растворились в γ -фазе; $\Delta a = a - 0,358$. В сложнолегированных сплавах значение Δa может быть определено по уравнению

$$\Delta a = 0,0218 \sum_{i=1}^n C_{\gamma'} (R_{\gamma'} - R_{Ni}),$$

где $C_{\gamma'}$ — концентрация γ' -образующего элемента; $R_{\gamma'}$ — атомный радиус γ' -образующего элемента.

Таким образом, степень легирования сплава, а также уровень прочностных и эксплуатационных свойств могут быть определены по изменению условного периода решетки a_{γ} . Поэтому жаропрочные сплавы на основе никеля удобно классифицировать по условному периоду решетки a_{γ} . Все сплавы можно разделить на три группы: у сплавов первой $a_{\gamma} \leq 0,358$ нм, у сплавов второй $a_{\gamma} = 0,358 \div 0,36$ нм, у сплавов третьей $a_{\gamma} > 0,36$ нм.

Сплавы первой группы могут иметь как однофазную структуру, так и двухфазную ($\gamma + \gamma'$) в зависимости от применяемой термической обработки. Рабочие температуры, при которых сплавы работают в течение 100 ч и напряжениях 98, 196, 392 и 588 МПа, соответственно составляют: $t_{100}^{98} = 790 \div 1000$ °С; $t_{100}^{196} = 660 \div 950$ °С; $t_{100}^{392} = 550 \div 840$ °С; $t_{100}^{588} = 540 \div 650$ °С. К этой группе относятся известные отечественные и зарубежные сплавы: ВЖЛ-10, ЖС-ЗД, ЭИ-765Л, Нимокаст 80, Нимокаст 90, Нимоник 90, Нимоник 95 и др.

Сплавы второй и третьей групп, как правило, имеют двухфазную структуру. Вид второй фазы определяется типом легирующих элементов. Сплавы второй группы имеют следующие характеристики жаропрочности: $t_{100}^{100} = 900 \div 1050$ °С; $t_{100}^{200} = 870 \div 960$ °С; $t_{100}^{300} = 680 \div 860$ °С; $t_{100}^{600} = 630 \div 780$ °С, а сплавы третьей группы соответственно 1030—1100 °С, 950—1000 °С, 800—890 °С, 750—800 °С. Представителями сплавов второй группы являются ВЖЛ36-Л2, ЖС-3, АНВ-300, ЖС-ЗДК, ЭИ-893Л, Нимокаст 257, Нимокаст 258, Инко 731С и др., а сплавов третьей группы — ЖС-6, ЖС-6К, ЖС-6У, MAR-200, MAR-211, MAR-246 и др. Следует отметить, что увеличение жаропрочности некоторых сплавов достигается формированием в их структуре помимо γ' -фазы также боридов и карбидов.

В литейных цехах никелевые сплавы чаще всего выплавляют в индукционных печах. Если в состав сплава входят сильно окисляющиеся элементы (Al, Ti), то плавку и разливку проводят в вакууме, что позволяет не только улучшать свойства сплавов, но и точнее регулировать их состав. Выплавка большей части жаропрочных сплавов может быть осуществлена двумя способами: переплавом в вакуумной индукционной печи (ВИП) заготовок, полученных вакуумно-дуговым или другим способом, или в ВИП с применением химически чистых шихтовых материалов (электролитического никеля, железа, ниобия, хрома, кобальта, штабиков вольфрама, кобальта и молибдена), а также некоторых ферросплавов для получения сплавов с повышенным содержанием железа.

Основными ферросплавами, используемыми при вакуумной плавке, являются феррохром, ферромolibден и феррониобий. Однако эти материалы вносят в расплав значительное количество серы и фосфора. Большую часть сплавов желательнее выплавлять в печах, для футеровки которых использованы высокомагнитные огнеупоры, а также оксид алюминия. Поскольку кислород, азот, сера являются вредными примесями в никелевых сплавах, то при выплавке последних необходимо проводить рафинирование. Способ рафинирования выбирается в зависимости от состава сплава. Удаление из расплава кислорода, азота, серы может быть осуществлено обработкой расплава РЗМ.

Отливки из большей части никелевых сплавов получают литьем по выплавляемым моделям. Обычная форма состоит из четырех—девяти слоев, первые два из которых называются облицовочными, а остальные опорными. В состав облицовочных слоев часто включают определенные соединения, стимулирующие зарождение центров кристаллизации при затвердевании отливки, например соединения кобальта.

§ 5. ОТЛИВКИ ИЗ КОБАЛЬТОВЫХ СПЛАВОВ

Использование кобальта в качестве основы жаропрочных, магнитных и других прецизионных сплавов связано с тем, что со многими элементами (Fe, Ni, Cr, Mo и др.) он образует широкие области твердых растворов. Снижение растворимости легирующих элементов в твердом растворе при понижении температуры приводит к образованию химических соединений и при соответствующей термической обработке позволяет получать кобальтовые сплавы с высокодисперсной гетерогенной структурой.

При термических ударах и циклических тепловых нагрузках до 1100 °С литые кобальтовые сплавы значительно более стойки, чем никелевые. Характерная особенность кобальтовых сплавов — способность сохранять жаропрочность до температуры, близкой к температуре плавления. При температуре ~ 980 °С их жаропрочность намного выше жаропрочности сложнелегированных никелевых сплавов, которые, в свою очередь, отличаются от кобальтовых более высокой жаропрочностью при пониженных температурах (750—860 °С).

Известны кобальтовые сплавы систем Co—Cr; Co—Cr—Ni; Co—Cr—Ni—W и многокомпонентные кобальтовые сплавы с легирующими элементами, придающими им высокую жаропрочность. Так же как и в никелевых, в кобальтовых жаропрочных сплавах содержится второй, главный компонент, — хром. Кроме этого, в состав кобальтовых сплавов входят углерод, молибден, вольфрам, ниобий и другие элементы. Высокая склонность кобальтовых сплавов к старению обеспечивает их упрочнение при высокой температуре.

Кобальтовые сплавы типа тантунг, содержащие 27—36 % Cr, 14—19 % W и до 7 % Nb или Ta, обладают хорошими литейными свойствами, высокой твердостью и прочностными характеристиками при высокой температуре, небольшим коэффициентом трения, хорошей коррозионной стойкостью и высоким сопротивлением ударным нагрузкам. Сплавы немагнитны. Кроме высокой жаростойкости, отливки из сплавов типа тантунг стойки в азотной, фосфорной, уксусной, молочной, лимонной и щавелевой кислотах, некоторых щелочных и других химически агрессивных средах.

Другие кобальтовые сплавы применяют для изготовления деталей, работающих в условиях напряжений и температур. Литой кобальтовый сплав HE-1049 (0,4 % C, 26 % Cr, 10 % Ni, 15 % W, 3 % Fe, 1 % Mo, 0,4 % V, остальное Co) обладает более высокой прочностью по сравнению с остальными литыми сплавами, а также с лучшими из деформируемых жаропрочных сплавов.

Повышению прочности способствует дисперсное твердение. Особенности структуры кобальтовых сплавов расширяют области их применения. Высокая дисперсность и гетерогенность структуры обеспечивает большую коэрцитивную силу некоторых кобальтовых сплавов, высокую устойчивость их против ползучести и т. д. Например, сплав кобальта с платиной после закалки при 1200 °C и отпуска при 650 °C имеет очень высокую коэрцитивную силу от 210 940 А/м, благодаря чему его используют для изготовления коротких постоянных магнитов.

Сплавы, содержащие 52 % Co, 35 % или 38,5 % Fe, 9,5 или 13 % V, имеют высокую пластичность при нормальной температуре. Они обладают коэрцитивной силой 23 880—36 620 А/м и максимальной плотностью магнитной энергии 40—140 Дж/см³. Из этих сплавов изготавливают постоянные магниты малого поперечного сечения. По плотности магнитной энергии сплавы кобальта с медью и никелем уступают перечисленным выше, но их также используют для изготовления постоянных магнитов.

Плавку кобальтовых сплавов проводят в индукционных печах (открытых или вакуумных, если в состав сплава входят легкоокисляющиеся элементы). В большинстве случаев отливки из кобальтовых сплавов изготавливают в керамических формах, полученных по выплавляемым моделям, а также в металлических формах.

§ 6. ОТЛИВКИ ИЗ ТУГОПЛАВКИХ СПЛАВОВ

Общепринятого разделения элементов на тугоплавкие и нетугоплавкие по температуре плавления еще нет. В одних случаях такой температурой считают 1600 °C, а в других 1875 °C. Если за нижний предел принять температуру 1600 °C, то к числу тугоплавких можно отнести V, W, Hf, Jf, Lu, Mo, Nb, Os, Pt, Re, Rh, Ta, Te, Th, Ti, Tc, Cr, Zr.

По температуре плавления перечисленные 18 металлов можно разделить на три подгруппы (по элементу, наиболее характерно представляющему тугоплавкость):

подгруппа хрома (температура плавления 1600—2000 °C) — Ti, V, Cr, Zr, Rh, Lu, Pt, Th;

подгруппа молибдена (температура плавления 2500—3000 °C) — Mo, Tc, Ta, Os;

подгруппа вольфрама (температура плавления выше 3000 °C) — W, Re.

По плотности тугоплавкие металлы подразделяют на легкие (до $5 \cdot 10^3$ кг/м³ — Ti), тяжелые ($5—10 \cdot 10^3$ кг/м³ — V, Cr, Zr, Nb, Lu) и очень тяжелые (свыше $10 \cdot 10^3$ кг/м³ — Mo, Tc, Rh, Hf, Ta, W, Os, Zr, Pt, Th).

Сплавы на основе титана. Титан обладает низкой теплопроводностью (в 13 раз меньше, чем алюминий, и в 4 раза, чем железо), низким модулем упругости 110 250 МПа, высоким электрическим сопротивлением и значительной анизотропией физических свойств, обусловленной его гексагональной структурой.

Технический титан, благодаря высокому сопротивлению коррозии, является прекрасным материалом для химического машиностроения, приборостроения, судостроения. Его используют для изготовления деталей насосов, перекачивающих агрессивные жидкости, теплообменников, работающих в условиях химически агрессивных сред, и т. д.

Свойства некоторых литейных титановых сплавов

Сплав	Массовая доля элемента, %				Свойства				
	Al	Mo	V	Другие	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ Дж/см ²
BT5Л	4,1—6,2	—	—	—	686	618	6	14	29,4
BT6Л	5—6,5	—	3,5—4,5	—	834	736	5	10	24,5
BT3—1Л	5,3—7	2—3	—	0,8—2,3 Cr, 0,15—0,4 Si, 0,2—0,7 Fe, 0,8—2 Zr, 0,2—0,35 Si	932	814	4	8	24,5
BT9Л	5,6—7	2,8—3,8	—	—	932	814	4	8	19,6
BT14Л	4,3—6,3	2,5—3,8	0,9—1,0	—	833	785	5	12	24,5
BT20Л	5,5—7,5	0,5—2	0,8—1,8	1,5—2,5 Zr	932	834	8	20	24,5

Титан является основой группы сплавов с малой плотностью, высокой удельной прочностью. Временное сопротивление полученных в последнее время титановых сплавов превышает 1470 МПа. Сплавы с низкой плотностью и такой прочностью эквивалентны сталям с временным сопротивлением 2500 МПа. Изделия из титановых сплавов хорошо работают при отрицательных температурах, вплоть до температуры жидкого азота.

В промышленности используют простые и сложные титановые сплавы (табл. 23). Разнообразие структур и свойств сплавов объясняется полиморфизмом титана, хорошей растворимостью в нем многих элементов, его способностью вступать в химические соединения с другими элементами.

Химические элементы, образующие с титаном сплавы, делят на три группы. К первой группе относятся элементы, повышающие стабильность α -фазы; их называют α -стабилизаторами. Основным элементом этой группы сплавов является алюминий. Сплавы титана с алюминием по значимости и распространению в промышленности занимают ведущее место.

Вторую группу составляют элементы, стабилизирующие β -фазу; их называют β -стабилизаторами. Их подразделяют на две подгруппы. В сплавах титана с элементами первой подгруппы при достаточно низкой температуре происходит эвтектоидный распад β -фазы. В эту подгруппу входят Cr, Mn, Fe, Cu, Ni, Be, W, Co. При достаточно высокой концентрации элементов второй подгруппы (V, Mo, Nb, Ta) β -твердый раствор сохраняется до нормальной температуры без эвтектоидного распада; β -стабилизаторы второй подгруппы иногда называют изоморфными стабилизаторами.

К третьей группе относят легирующие элементы — нейтральные упрочнители, не оказывающие существенного влияния на устойчивость α - и β -фаз (Sn, Zr, Ge, Hf, Th).

В зависимости от того, какая структура преобладает в титановых сплавах после термической обработки, их делят на α -, ($\alpha + \beta$) и β -классы.

В промышленности нашли применение двойные сплавы титан—алюминий; сложные сплавы, легированные кроме алюминия другими (нейтральными) упрочнителями; сложные сплавы мартенситного типа, в состав которых помимо алюминия, введены β -стабилизаторы в таком количестве, которое еще не вызывает появления в структуре при нормальной температуре β -фазы; сложные сплавы, содержащие кроме алюминия цирконий, ниобий и тантал; сплавы, в структуре которых кроме α -фазы содержатся интерметаллиды, например, сплавы системы Ti—Al—Sn—Cu.

Термодинамически устойчивую β -фазу можно получить в сплавах, в которых легирующие элементы имеют объемно-центрированную кубическую решетку при

нормальной температуре и дают с β -титаном непрерывный ряд твердых растворов. К числу таких элементов относятся ванадий, хром, молибден, ниобий и тантал.

В составе сплавов имеются также нежелательные примеси, содержание которых не должно превышать, %: 0,2 С, 0,2 O_2 , 0,05 N_2 , 0,015 H_2 , 0,6 Fe, 0,2 Si, 0,8 Zr, 0,2 W. Сплав ВТ5Л является типичным представителем α -титановых сплавов. Остальные сплавы представляют собой $\alpha + \beta$ -титановые сплавы. Сплавы ВТ5Л, ВТ6Л рекомендуются для литых деталей, работающих длительный период при температуре до 400 °С, сплав ВТ3—1Л — до 450 °С, сплавы ВТ9Л и ВТ20Л — до 500 °С.

Плавка титана и сплавов на его основе сопряжена с большими трудностями. При высокой температуре титан активно взаимодействует с азотом и кислородом. Образование нитрида титана в этих условиях протекает так же активно, как горение некоторых веществ в среде кислорода, поэтому плавку титановых сплавов проводят в условиях, исключающих возможность его контакта с этими газами. Расплавленный титан также активно взаимодействует со всеми обычными огнеупорными материалами, из которых выполнена плавильная зона агрегата. Из всех известных огнеупоров менее интенсивно с титаном взаимодействует плотный графит, но и он во многих случаях не может быть использован, так как в титановых сплавах содержание углерода строго ограничено.

Наиболее совершенным плавильным агрегатом для выплавки титана и его сплавов является вакуумная гарнизанная дуговая печь с расходуемым электродом. В таких печах могут быть выплавлены различные порции жидкого металла — от нескольких граммов до нескольких тонн.

Для изготовления фасонных отливок из титана и его сплавов песчаные формы по указанным выше причинам непригодны. Отливки с чистой поверхностью можно получать в массивных медных и тонкостенных медных водоохлаждаемых формах, однако их использование ограничено высокой стоимостью и невозможностью получения отливок сложной конфигурации. Удовлетворительным материалом для изготовления форм является плотный графит. Графитовые формы можно использовать несколько раз, но и их стоимость достаточно высока. Более дешевыми являются оболочковые формы из смеси высокоогнеупорных нейтральных оксидов или графитового порошка с фенолформальдегидной смолой (связующим).

Во всех случаях применения литейных форм из высокоогнеупорных материалов поверхность отливок оказывается в той или иной мере загрязненной продуктами взаимодействия титана с материалом формы. При использовании плотного графита глубина загрязненного слоя составляет 1 % толщины стенки. Заливаемой в оболочковые формы из смеси крупнозернистого графитового порошка и фенолформальдегидной смолы получают отливки толщиной до 50 мм, поверхность которых может быть загрязнена на глубину до 1,5 мм. Мелкие сложные тонкостенные отливки из титановых сплавов можно получать в формах, изготовленных по выплавляемым моделям. В качестве материала для форм используют кремнезем, циркон, диоксид циркония, силлиманит, а в качестве связующего — этилсиликат, фосфорнокислый аммоний, нитрат циркония.

Для получения качественных отливок литниково-питающая система должна обеспечивать быстрое заполнение формы и надежное питание толстых сечений.

Современная техника позволяет получать отливки из титановых сплавов с минимальной толщиной стенки 1,5 мм при ширине или высоте отливки 25 мм.

Сплавы на основе ванадия. Ванадий в качестве основы литейных сплавов применяют сравнительно недавно. По этой причине сведения о применении и свойствах ванадиевых литейных сплавов ограничены. Их используют при температуре до 675 °С.

Ванадий имеет хорошую теплопроводность и коррозионную стойкость. Установлено, что свойства ванадия улучшаются при сплавлении его с титаном, цирконием, ниобием и некоторыми другими элементами. Сплавы ванадия с титаном и цирконием обладают значительно большей пластичностью, чем чистый ванадий. Легирование ниобием способствует получению более высокой прочности и увеличению сопротивляемости окислению.

Сплав ванадия с 50 % Ti и 5 % Al имеет более высокую прочность, чем сплавы на основе никеля, кобальта и железа. Длительная прочность его при 300 °C соизмерима с прочностью титановых сплавов.

Сплавы на основе хрома. Фасонные отливки из хрома и его сплавов применяют ограниченно. К числу положительных свойств хрома и его сплавов следует отнести высокую жаропрочность, а также повышенную стойкость в окислительных и эрозивных средах при высокой температуре. Вместе с тем для хрома характерны низкая пластичность при нормальной температуре, высокое значение порога хрупкости и большая склонность к ухудшению свойств под влиянием незначительного количества примесей, в первую очередь газов.

Отливки из хромовых сплавов предназначены для работы при температуре 980—1200 °C.

Чистый хром при 900 °C и напряжении 47 МПа имеет высокую ползучесть. Многие элементы (Co, Ni, Pb, Al, Si, Ti) повышают, а Fe (9,5—15 %) понижает его ползучесть. Сплав хрома с 10 % Fe и 5—10 % Ta имеет наименьшую ползучесть при 800 °C и напряжении 142 МПа. Общая деформация такого сплава за 100 ч составляет ~0,25 %.

Введение молибдена в сплав хрома с железом (15 % Fe и 25 % Mo) обеспечивает получение длительной прочности (около 1000 ч) при температуре 870 °C и напряжении 137 МПа; удлинение образцов в этих условиях составляет 8—10 %. Введение в эти сплавы до 40 % никеля делает их при нормальной температуре пластичными.

Сплав из 60 % Cr и 30 % Fe с Mo, Ti, Al при 815 °C и напряжении 192 МПа имеет длительную прочность 100 ч и хорошую термическую стойкость.

Сплавы на основе хрома по жаропрочности превосходят все известные жаропрочные сплавы на основе железа, никеля, кобальта. Отливки из хрома и его сплавов можно изготавливать только специальными способами литья.

Сплавы на основе ниобия. Фасонные отливки из ниобия и его сплавов используют при высокой температуре, например для деталей турбин, работающих при 1100—1400 °C. Высокие жаропрочность и жаростойкость ниобия и его сплавов, несмотря на большие технологические трудности, делают их перспективными для изготовления изделий, работающих в особо тяжелых условиях.

Применение ниобиевых сплавов позволит повысить температуру газа при входе в турбину от 925 до 1370 °C.

Чистый ниобий обладает очень высокой пластичностью при нормальной температуре, коррозионной стойкостью, хорошими эмиссионными свойствами и хорошо сваривается. При температуре белого каления прочность ниобия выше, чем любого другого конструкционного материала.

Сплав на основе ниобия, содержащий 5—35 % Cr и 5—30 % Ti, при 1000 °C имеет наибольшую, чем у всех других сплавов, окалиностойкость. Временное сопротивление сплава при 20 °C составляет 1653,3 МПа, а при 1300 °C — 743,8 МПа. Сплав ниобия с 0,75—1 % Zr имеет температуру плавления около 2400 °C и плотность $8,6 \cdot 10^3$ кг/м³.

Наибольшей жаропрочностью обладают сплавы ниобия с 15 % W, 5 % Mo, 1 % Zr и с 15 % W, 5 % Mo, 1 % Zr, 5 % Ti. Литые изделия из ниобия и его сплавов получают только специальными способами.

ГЛАВА 12 СПЕЦИАЛЬНЫЕ СПОСОБЫ ЛИТЬЯ

По сложившейся технической классификации к специальным способам литья относят: литье по выплавляемым моделям, в оболочковые и керамические формы, литье в кокиль и под давлением, центробежное, электрошлаковое и непрерывное литье, литье под регулируемым давлением (под низким давлением, противодавлением, вакуумным всасыванием), литье выжиманием, штамповку отливок из расплава и др. Эти способы отличаются от способа литья в разовые песчаные формы по одному или нескольким признакам: по конструкции формы, материалу, из которого она выполнена, использованию внешних сил при заполнении форм и затвердевании отливок и др. Одни из них основаны на применении

постоянных форм (литье в кокиль, под давлением и пр.), другие — разовых, причем форма может представлять собой одно- или многослойную оболочку (литье в оболочковые формы по выплавляемым моделям). Заполнение форм и затвердевание отливок в них происходит под действием силы тяжести, центробежных сил, избыточного давления, создаваемого воздухом (газом) или поршнем.

Вместе с тем не всегда легко разграничить способы литья. Например, литье в кокиль отличается от литья в разовые песчаные формы только материалом литейной формы; и те и другие заполняются расплавом под действием его силы тяжести.

Однако во многих случаях их трудно разграничить как по конструктивно-технологическому, так и по теплофизическому признаку. В разовых песчаных формах нередко используют металлические холодильники, а в кокилях — песчаные стержни. По мере увеличения поверхности, формируемой холодильником, разовая песчаная форма постепенно трансформируется в кокиль с песчаным стержнем. Поэтому по конструктивно-технологическому признаку кокилем считают литейную форму, металлические части которой составляют ее основу и участвуют в формировании конфигурации и свойств отливки. С другой стороны, кокиль, с целью регулирования скорости затвердевания и повышения срока службы формы, покрывают со стороны рабочей поверхности слоем теплоизоляционной краски или футеровки. По мере увеличения толщины слоя краски (футеровки) влияние кокиля на формирование отливки убывает, и по выполняемой роли она постепенно трансформируется в опоку. Поэтому по теплофизическому признаку футерованную металлическую форму рекомендуют считать кокилем, если выполняется условие $x_{кр} \leq x_0$, где $x_{кр}$ — толщина слоя краски (покрытия); x_0 — характерный размер отливки (половина толщины стенки для плоской или радиус для цилиндрической и сферической отливки).

Литье под низким давлением в настоящее время рассматривают как самостоятельный способ, хотя он является разновидностью литья под давлением и сформировался в результате совершенствования варианта литья под давлением, основанного на использовании в период заполнения форм и затвердевания отливок давления сжатого воздуха (газа) от пневматических машин (компрессоров). В последние годы разработаны новые смешанные варианты этих способов литья. Заполнение форм расплавом осуществляют, например, по режимам литья под низким давлением, затем полость формы отсекают от металлопровода и на затвердевающий расплав воздействуют высоким давлением, создаваемым поршнем.

Можно привести другие примеры, свидетельствующие об определенной условности приведенной классификации специальных способов литья.

Технологические особенности определяют рациональную область применения каждого из специальных способов литья. Общим для них является то, что все они относятся к прогрессивным материало-, энерго- и трудосберегающим технологическим процессам. Эти способы позволяют получать отливки с конфигурацией и размерами, максимально приближающимися к готовому изделию, с чистой и гладкой поверхностью, с высокими механическими и эксплуатационными свойствами. Специальные способы отличаются высоким технологическим выходом годного литья, низким расходом формовочных материалов, несильным вредным воздействием на окружающую среду и благоприятными условиями труда. Экономичность специальных способов литья повышается с увеличением числа отливок в изготавливаемой партии, т. е. с переходом производства от мелкосерийного к серийному и массовому.

§ 1. ЛИТЬЕ В ОБОЛОЧКОВЫЕ ФОРМЫ

Способ литья в оболочковые формы основан на получении полуформ и стержней в виде оболочек толщиной 6—10 мм. Их изготавливают путем отверждения на металлической оснастке слоя смеси, в которой связующее при нагреве вначале расплавляется, а затем затвердевает (необратимо), придавая оболочке высокую прочность.

Технология литья в оболочковые формы включает ряд операций, выполнение которых при литье данным способом имеет особенности. К ним относятся: приготовление лакированной песчано-смоляной смеси; формирование на модельной оснастке тонкостенных оболочковых полуформ и стержней; сборка форм и их подготовка к заливке. Особенности обусловлены свойствами связующего, в качестве которого обычно используют pulverбакелит ПК-104 — смесь фенолдоформальдегидной смолы марки 104 с 8 % уротропина. В исходном состоянии смола термопластична, т. е. при нагреве и охлаждении обратимо расплавляется и затвердевает. В присутствии уротропина она становится термореактивной, полимеризуется и затвердевает необратимо. Твердение смолы ускоряется при 200—250 °С. При нагреве выше 400 °С связующее разлагается.

Лакированную смесь готовят горячим и холодным способами. При горячем лакировании мелкозернистый песок, предварительно нагретый до 150 °С, смешивают в бегунах со смолой 104. Последняя при 70—130 °С расплавляется и обволакивает зерно песка тонкой пленкой. По мере перемешивания смесь охлаждается и комкуется вследствие обратимого затвердевания смолы. Перемешивание продолжают до полного разминания комьев и получения сыпучей смеси, в которой каждая песчинка лакирована (покрыта) пленкой термопластичной смолы. После охлаждения до 60 °С и ниже в смесь добавляют уротропин для обеспечения последующего необратимого твердения смеси на модельной оснастке. При более высокой температуре ввода уротропина процесс необратимого твердения развивается на стадии приготовления смеси, что недопустимо. Для ускорения охлаждения смеси и более равномерного распределения уротропина его вводят в виде 30 %-ного водного раствора.

При холодном лакировании pulverбакелит растворяют в спирте или ацетоне и перемешивают с песком. Песчинки смачиваются раствором смолы и покрываются пленкой. Смесь при непрерывном перемешивании продувают воздухом. При этом растворитель испаряется и на песчинках остается тонкая твердая пленка термореактивной смолы. Испарение растворителя сопровождается образованием комьев смеси. После полного высыхания комья также разминают до получения однородной сыпучей смеси.

Модели, модельные плиты и стержневые ящики изготавливают преимущественно из чугуна, реже из стали и алюминиевых сплавов. Оболочковые полуформы получают на модельных плитах 1 (рис. 99, а), нагретых до 200—250 °С. Рабочую поверхность плит с помощью pulverизатора покрывают разделительным составом для предотвращения прилипания смеси к модели. В качестве разделительного состава используют силиконовую и другие жидкие композиции. На горловину поворотного бункера 2 устанавливают горячую модельную плиту, укрепляют ее и затем бункер переворачивают на 180°. Таким путем песчано-смоляную смесь 3 высыпают на плиту. Под действием теплоты модельной плиты слой 4 смеси, прилегающий к ней, за 15—25 с прогревается до температуры расплавления смолы на глубину 6—10 мм. В этом случае зерна смеси оказываются склеенными смолой. После возвращения бункера в исходное положение модельную плиту вместе с оставшейся на ней полутвердой оболочкой помещают в печь, где она при температуре 300—350 °С необратимо затвердевает в течение 50—60 с. Прочную оболочковую полуформу 5 снимают с модельной плиты с помощью выталкивателей. Таким же образом изготавливают вторую оболочковую полуформу. С повышением давления, приложенного к насыпанной на модель смеси, формирование оболочки ускоряется, и ее прочность возрастает. В связи с этим над модельной плитой толщину слоя смеси увеличивают или же ее подпрессовывают, прикладывая избыточное внешнее давление.

Оболочковые стержни получают аналогичным способом. В нагретый и смазанный разделительным составом стержневой ящик 6 (рис. 99, б) засыпают песчано-смоляную смесь 7. Через 15—20 с после оплавления поверхностного слоя из ящика высыпают остальную непрогретую, сохранившую сыпучесть, смесь. Оболочка твердеет при дальнейшем нагревании ящика. Затем ящик раскрывают и извлекают стержень 8.

При сборке в охлажденную полуформу устанавливают стержень и на нее накладывают вторую полуформу. Точность сборки обеспечивают с помощью углублений или соответствующих им выступов, которые выполняют по краям по-

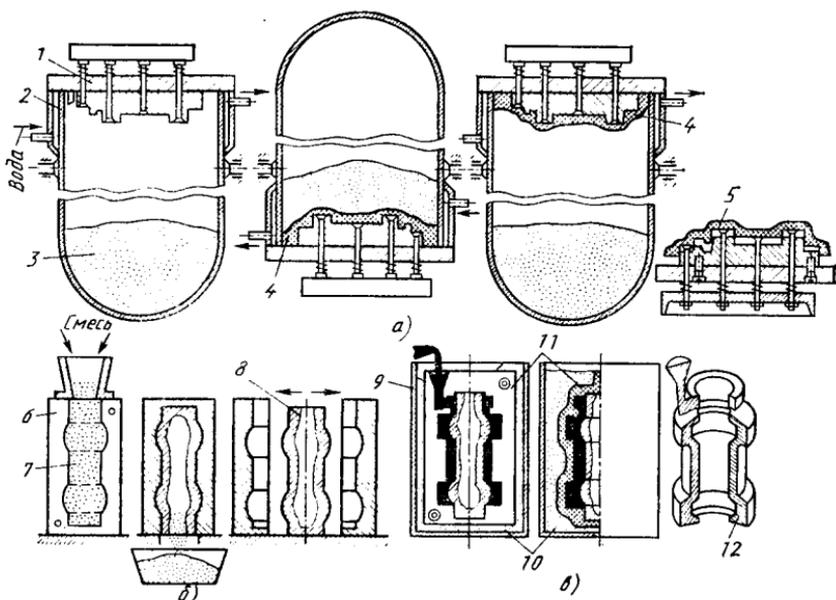


Рис. 99. Схема литья в оболочковую форму

луформ. В мелкосерийном производстве полуформы прижимают друг к другу механическими приспособлениями: скобами, струбцинами. В массовом и крупносерийном производстве их склеивают, для чего на нижнюю полуформу по контуру изготавливаемой отливки наносят клей, прижимают к ней вторую горячую (120—150 °С) полуформу и выдерживают в течение 5—10 с для отверждения клея.

Готовые оболочковые формы заливают в горизонтальном или вертикальном положении. Перед заливкой оболочковые формы 11 (рис. 99, б) засыпают в металлических коробках (опоках) 9 песком или чугунной дробью 10. Применение опорного наполнителя позволяет получать отливки в тонкостенных оболочковых формах. При литье без опорного наполнителя необходимо увеличивать толщину оболочковых форм или (и) выполнять на их наружных поверхностях упрочняющие ребра. Однако это сопряжено с увеличением затрат на их изготовление, прежде всего из-за повышенного расхода смеси (смолы). Оболочковая форма за счет теплоты залитого металла прогревается. При температуре свыше 400 °С связующее разлагается, и оболочка постепенно разупрочняется. Вследствие этого существенно улучшаются податливость и выбиваемость форм, отливки 12 легко освобождаются от остатков оболочки.

Особенности способа и области его применения. При отверждении смеси непосредственно на модели или в стержневом ящике получают более точные и стабильные по размерам полуформы и стержни. Оболочки обладают достаточной прочностью и жесткостью в период заливки и затвердевания сплава. Все это обеспечивает повышение точности отливок, а использование в смесях мелкозернистых песков — снижение шероховатости их поверхности. Разупрочнение оболочки при высоких температурах способствует свободной усадке отливки, снижает в них внутренние напряжения и облегчает выбивку форм.

Отмеченные особенности дают возможность изготовлять сложные тонкостенные отливки массой до 300 кг, точные по размерам и с гладкой (чистой) поверхностью, например, ребристые цилиндры для мотоциклов, коленчатые валы для автомобильных двигателей и др.

Оболочковые стержни применяют не только в оболочковых, но и в песчаных формах, а также в кокилях для выполнения сложных полостей в отливках. Сле-

дует отметить два обстоятельства, ограничивающих область применения оболочковых форм и стержней из смесей на терморезистивных смолах. Первое — это ограничение размеров форм (полуформ) ввиду снижения жесткости и коробления, второе — возможность насыщения металла в поверхностных зонах углеродом, что делает нежелательным использование таких форм при производстве отливок из низкоуглеродистых, в частности коррозионно-стойких сталей. Второе ограничение устранимо при изготовлении оболочковых форм их смесей с неорганическими связующими материалами.

Расход формовочной смеси при литье в оболочковые формы в 8—10 раз меньше, чем при литье в песчаные формы. После термической регенерации песок можно использовать повторно. Изготовление оболочек хорошо поддается автоматизации. Недостатком технологического процесса является использование дорогого связующего материала — пульвербакелита.

§ 2. ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

При литье по выплавляемым моделям форма представляет собой неразъемную керамическую огнеупорную оболочку, которая формируется из жидких формовочных смесей вокруг разовых неразъемных моделей. Затем модели удаляют из формы: выплавляют, растворяют или выжигают. Удаление остатков модельного состава и упрочнение оболочки достигается прокаливанием формы при высокой температуре. Заполнению тонких и сложных по конфигурации полостей формы способствует ее нагрев перед заливкой.

Технология литья по выплавляемым моделям является многооперационной. Специфическими операциями являются: изготовление разовой неразъемной модели самой отливки, а также разовой модели литниково-питающей системы; сборка этих моделей в единые блоки; приготовление суспензии из связующего и пылевидного огнеупорного наполнителя; формирование на модельных блоках огнеупорной оболочки; удаление моделей из оболочки без нарушения ее целостности; упрочнение оболочки прокаливанием.

Модели получают из легко расплавляющихся, сгорающих или растворяющихся материалов. Наиболее часто применяют модельные составы на основе парафина и стеарина, а также церезина, воска и других компонентов, которые относительно легколавки ($t_{пл} = 50—100^\circ\text{C}$). В то же время температура их размягчения превышает температуру производственных помещений ($t_{пл} \geq 30^\circ\text{C}$). Растворяемые модели получают из составов на основе карбамида, азотокислых и других водорастворимых солей, выжигаемые — из полистирола, а испаряемые — из сухого льда и других материалов.

Выплавляемую модель 3 (рис. 100, а) отливки 1 получают путем заполнения металлической пресс-формы 2 жидким или пастообразным модельным составом. В первом случае пресс-форму заполняют свободной заливкой или под давлением, во втором — запрессовкой твердого состава, смешанного с 8—20 % воздуха. В пресс-формах модельный состав затвердевает и остывает. Затем модели отливок извлекают и соединяют с отдельно изготовленными выплавляемыми моделями литниково-питающей системы 4 в блок (рис. 100, б). Модели, полученные в одноместных пресс-формах, припаивают паяльником 5. В многоместных пресс-формах получают звенья из нескольких моделей, которые связаны друг с другом общей втулкой. При сборке модель литниковой воронки и звенья моделей насаживают на металлический каркас. В блоке моделей втулки, надетые на каркас, образуют стояк. Модели литниковой воронки изготавливают в отдельной пресс-форме. Литниковая система при литье по выплавляемым моделям служит не только для заполнения полости формы расплавом, но и для питания затвердевающей отливки. Металл подводят в наиболее массивные части отливок.

Для получения оболочковой формы модельный блок окунают в огнеупорную суспензию (рис. 100, в) и обсыпают песком в псевдооживленном слое (рис. 100, г) или пескосыпе. Полученное огнеупорное покрытие отверждают путем сушки на воздухе (рис. 100, д) или в парах аммиака. Затем на блок наносят таким же образом второй и последующие слои. Первый слой обсыпают песком, размер частиц которого 0,2—0,315 мм; последующие слои — крупнозернистым песком.

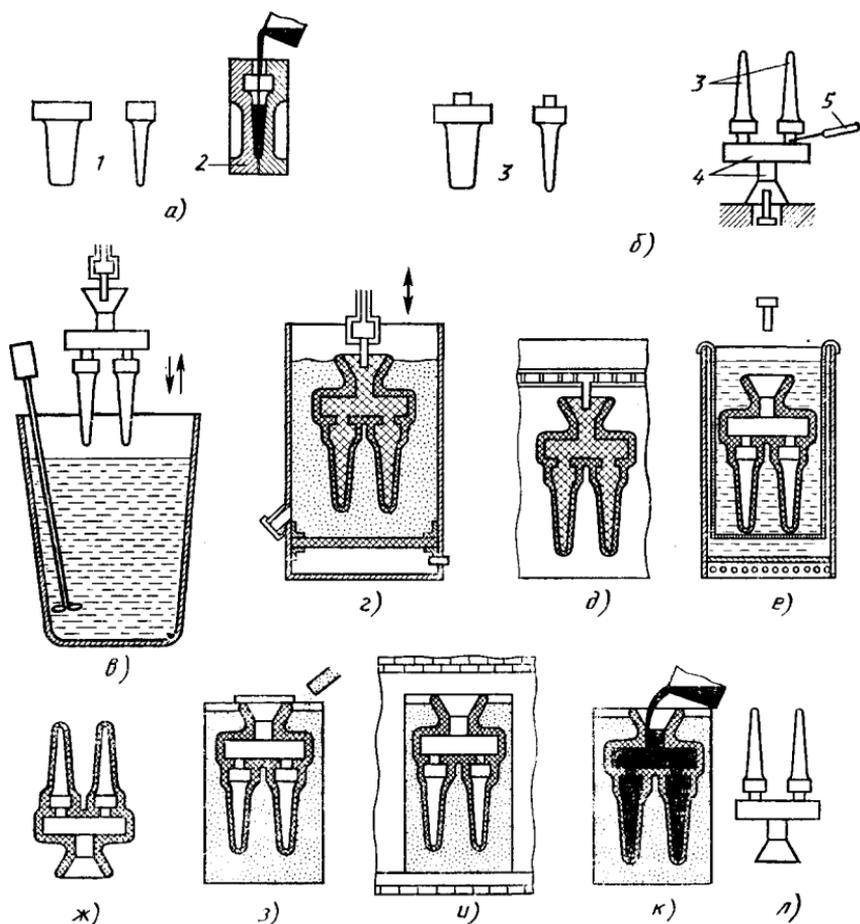


Рис. 100. Схема процесса изготовления отливок по выплавляемым моделям

Обычно оболочковую форму получают четырех—шестикратным нанесением огнеупорного покрытия. При изготовлении крупных отливок на модельном блоке формируют более 12 слоев. После сушки последнего слоя модель выплавляют в горячей воде или расплаве модельной массы (рис. 100, *е*). Затем оболочковую форму подсушивают на воздухе (рис. 100, *ж*). Перед заливкой жидким металлом оболочку засыпают в опоке (рис. 100, *з*) опорным наполнителем (обычно кварцевым песком) и обжигают в печи при 800—1100 °С (рис. 100, *и*) для удаления остатков модельной массы, влаги, продуктов неполного гидролиза, а также для упрочнения оболочки спеканием. В массовом производстве оболочки заформовывают горячим опорным наполнителем после их предварительного обжига. Толстостенные оболочковые формы заливают без опорного наполнителя.

Жидкий металл заливают в горячую или охлажденную оболочковую форму (рис. 100, *к*). Ее температура при заливке стали и чугуна составляет 800—900 °С, сплавов на основе никеля — 900—1100 °С, меди — 600—700 °С, алюминия и магния — 200—250 °С.

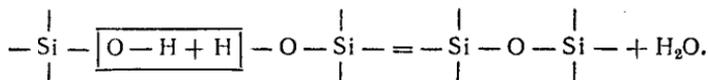
После охлаждения отливок их выбивают из формы на решетках. Опорный наполнитель просыпается через решетку, а блок отливок (рис. 100, *л*) после даль-

нейшего охлаждения подвергают предварительной очистке на вибрационных установках. При изготовлении мелких отливок операция предварительной очистки совмещается с операцией отделения литниковых систем. Под действием вибрации отливки отделяются от стояка по наиболее тонкому сечению — месту пережима питателя. Литниковые системы крупных отливок отделяют на металлорежущих станках и прессах, газопламенной и анодно-механической резкой.

При предварительной очистке и отделении отливок оболочка удаляется с наружных поверхностей отливок, но она прочно удерживается в отверстиях и поднутрениях. Остатки керамической оболочки, составляющей до 10 % от первоначального количества, удаляют при окончательной очистке. Для этого применяют обычные механические методы (см. гл. 7), а также химическую очистку в щелочной среде. Стальные и чугунные отливки выщелачивают в 45—55 %-ных водных растворах NaOH или KOH, нагретых до 150 °С, или в расплавах щелочей при 500 °С. Керамическая оболочка разрушается за счет взаимодействия SiO₂ с щелочью, образуя силикаты натрия или калия. Для интенсификации процесса выщелачивания совмещают с механической очисткой во вращающихся галтовочных барабанах. После выщелачивания отливки промывают в горячей воде, затем пассивируют в водном растворе соды и сушат. При необходимости очищенные отливки подвергают термической обработке в печах с защитной атмосферой. Дальнейшую финишную обработку отливок осуществляют методами, описанными в гл. 7.

Основными компонентами огнеупорной суспензии являются жидкий связующий раствор и тугоплавкий наполнитель. В качестве связующего используют гидролизированный раствор этилсиликата (ЭС). Последний представляет собой смесь эфиров кремниевых кислот, которые описываются общей формулой (C₂H₅O)_{2n+2} Si_nO_{n+1}, где n = 1, 2, 3, ... ЭТС и вода не растворяются друг в друге, поэтому реакция гидролиза протекает на границе их раздела. Для ускорения гидролиза ЭТС и воду смешивают в быстроходных мешалках с целью диспергирования ЭТС на мельчайшие капли и увеличения поверхности его раздела с водой, на которой протекает реакция гидролиза. При использовании спирта или ацетона, в которых растворяются и ЭТС и вода, реакция гидролиза идет по всему объему, поэтому допустимо менее интенсивное перемешивание. Для ускорения гидролиза вводят катализатор HCl.

При гидролизе этоксильные группы C₂H₅O частично замещаются гидроксильными. Этот процесс сопровождается поликонденсацией — укрупнением молекул. Спивка более простых молекул в сложные с образованием линейных и сетчатых структур происходит через гидроксильные группы:



При гидролизе малым количеством воды связующий раствор имеет свойства кремнийорганического полимера. Он отверждается в атмосфере влажного аммиака; при этом завершается реакция гидролиза, этоксильные группы полностью замещаются гидроксильными с образованием поликремниевых кислот n SiO₂(n + 1) H₂O. Рост этих молекул приводит к увеличению вязкости раствора и образованию силикозоли. При высушивании и обжиге она сначала превращается в гель, а затем в твердый кремнезем SiO₂. Выход SiO₂ из исходного ЭТС марки 40 составляет 40 ± 2 %, а из связующего раствора должно быть ниже 12—16 %. Поэтому требуемую концентрацию SiO₂ получают при разбавлении связующего раствора в процессе гидролиза или после него органическими растворителями (спиртом, ацетоном) или водой.

С увеличением расхода воды на гидролиз возрастает доля этоксильных групп, замещенных гидроксильными на этапе приготовления связующего раствора, поэтому при большом расходе воды сразу образуются золи кремниевых кислот. Такое связующее отличается малой живучестью, оно быстро отверждается на воздухе при незначительной влажности.

Огнеупорную суспензию готовят двумя способами. По первому (раздельному) способу вначале получают связующий раствор, затем в него добавляют тугоплав-

кний наполнитель и перемешивают в течение 40—60 мин. По второму (совмещенному) способу связующий раствор и суспензию готовят одновременно в одном реакторе. В качестве тугоплавкого наполнителя используют пылевидные кварц или электрокорунд. Их расход составляет соответственно 2,4—2,7 и 2,6—3 кг на 1 кг связующего раствора.

В связи с дефицитностью и высокой стоимостью ЭТС, а также с целью исключения из производства органических пожаро- и взрывоопасных растворителей (спирта и ацетона) в качестве связующего огнеупорной суспензии используют растворенные в воде жидкое стекло и продукты его переработки: кремнезоли, а также фосфаты, оксинитраты, оксихлориды различных металлов, другие соли. Из огнеупорной суспензии с указанными связующими формируют как облицовочный, так и упрочняющие наружные слои оболочковой формы. Однако такие оболочковые формы используют ограниченно из-за сложности технологического процесса их изготовления, нестабильности или низкого качества получаемых форм, обусловленного свойствами связующих (большой усадкой оболочек при сушке и обжиге, их размягчением и деформированием при высокой температуре, потерей связующими свойств после замирания). Кроме того, не все перечисленные связующие материалы в достаточном количестве и требуемого качества поставляются промышленностью.

Оболочковую форму получают также электрофоретическим способом. На модельный блок 1 наносят токопроводящий слой 2 (рис. 101). Для этого модели вначале окунают в токопроводящую суспензию, приготовленную из электролита (40 %-ного водного раствора KOH) и связующего (жидкого стекла или кальций-алюмохромфосфата) в соотношении 1,5 : 1 по объему, а также пылевидного кварца (4 кг на 1 дм³ раствора). Затем смоченный модельный блок обсыпают кварцевым песком. Далее модельный блок погружают в электрофоретическую суспензию 4, приготовленную из водного раствора электролита (0,04 %-ного тринатрийпирофосфата или гексаметафосфата натрия), пылевидного кварца (1,4 кг на 1 дм³ раствора) и кварцевого песка (1 кг на 1 дм³ раствора), и вновь обсыпают кварцевым песком. Вместо кварца в качестве огнеупорных материалов используют шамот или электрокорунд. Металлический электролизер 5 подключают к отрицательному полюсу источника постоянного тока. Роль анода выполняет металлический каркас стойка модельного блока 1 вместе с выплавляемыми моделями и токопроводным слоем 2. При включении тока напряжением 45—60 В огнеупорный наполнитель в водной суспензии перемещается к аноду и осаждается на токопроводном слое, образуя форетический слой 3. Электрофоретический перенос огнеупорного наполнителя в жидкости под действием электрического поля обусловлен зарядностью частиц

вследствие образования на их поверхности двойного электрического поля. За 60—90 с на модели за одну операцию осаждается огнеупорный слой толщиной 6—8 мм. Форму подсушивают на воздухе и сушат в шкафу при влажности 60—85 %. Последующие операции удаления модели и обжига формы выполняют по обычной технологии.

При электрофоретическом способе формирования оболочкового огнеупорного слоя на выплавляемой модели значительно сокращается число технологических операций, однако качество поверхности отливок при этом способе несколько ниже, чем при литье в этилсиликатные оболочковые формы. Поэтому для улучшения качества отливок на модель сначала наносят этилсиликатное покрытие по обычной технологии. После проявливании в течение 4—6 мин на нем формируют токопроводный и электрофоре-

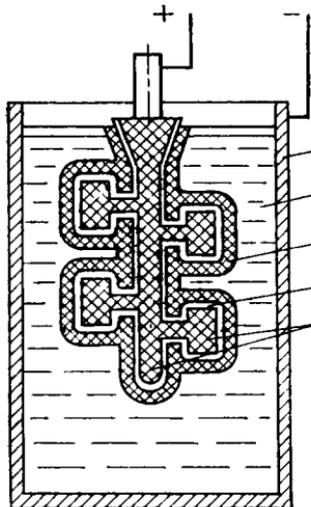


Рис. 101. Схема электрофоретического способа формирования огнеупорного оболочкового слоя на выплавляемой модели

тический слон. Трехслойную оболочку получают за 15—20 мин. Для изготовления отливок массой 8 кг и более без опорного наполнителя после сушки в течение 5—10 ч первого электрофоретического слоя формируют второй токопроводный и электрофоретический слон. Продолжительность изготовления электрофоретических оболочковых форм в 1,5—2 раза меньше, чем этилсиликатных.

Особенности способа и области его применения. Отсутствие разъема формы обеспечивает повышенную точность размеров и массы отливок, а формирование керамической оболочки из мелкозернистого огнеупорного наполнителя — высокую чистоту поверхности. Заливка в горячие формы улучшает ее заполняемость жидким металлом. При этом становится возможным получение сложных по конфигурации отливок массой от нескольких граммов до десятков килограммов со стенками толщиной 0,6—5 мм и размерами до 1 м. Вследствие медленного остывания металла в форме улучшается питание отливок за счет большего развития фильтрации расплава из литниково-питающей системы, но укрупняется структура. Незаотворность оболочек после обжига предупреждает образование в отливках газовых раковин.

Литье по выплавляемым моделям широко применяют для производства мелких сложных отливок в приборо-, автомобиле-, тракторостроении и других отраслях машиностроения. Применение выплавляемой модели, которая может быть составлена из отдельных частей путем пайки или склеивания, позволяет получать литьем сложные цельные детали, которые не удается изготовить другими способами обработки металлов. Этим способом получают детали турбинных лопаток из жаропрочных сплавов, которые плохо обрабатываются резанием, колеса насосов из коррозионно-стойких сплавов, детали турбомашин, постоянные магниты с ориентированной кристаллической структурой и др.

Себестоимость 1 т отливок, получаемых литьем по выплавляемым моделям, в 3—10 раз выше, чем отливок, получаемых литьем в песчаные формы. Однако за счет высокого качества отливок, уменьшения объема механической обработки общие расходы на изготовление детали ниже. Особенно экономически эффективно применение этого способа при массовом и серийном производстве мелких деталей.

Получение деталей из точных отливок эффективнее, чем из поковок: расход металла и трудоемкость механической обработки сокращаются на 30—80 %, а себестоимость уменьшается на 22—80 %.

§ 3. ЛИТЬЕ В КОКИЛЬ

Кокилем называют металлическую литейную форму из чугуна, стали или алюминиевых сплавов, полость которой заполняется расплавом под действием его силы тяжести (рис. 102).

Принципиальное отличие от ранее рассмотренных способов литья состоит в том, что металлическая форма в целом (или большая часть ее элементов), изготовленная из металла, многократно используется для получения большого числа отливок. Отдельные элементы кокиля, главным образом, стержни, формирующие сложные внутренние полости отливки, могут быть изготовлены из песка на том или ином связующем и предназначаться только для разового использования.

Технология литья в кокиль. Особенностью технологии является подготовка кокиля к заливке, которая заключается: в окраске рабочих поверхностей полости специальными красками, состав которых определяется видом сплава; в доведении (нагревом или охлаждением) температуры кокиля до оптимального для данного сплава уровня и сборке формы (проставке стержней, соединении металлических частей в единое целое). Все последующие операции технологического цикла такие же, как при литье в разовые песчаные формы. Следует лишь отметить, что значительно облегчаются, а чаще исключаются операции очистки поверхностей отливок.

Кокиль быстрее песчаной формы отводит теплоту перегрева и кристаллизации сплава. Интенсивность затвердевания отливки, а также ее отдельных частей регулируют температурой нагрева кокиля и толщиной теплоизоляционной краски.

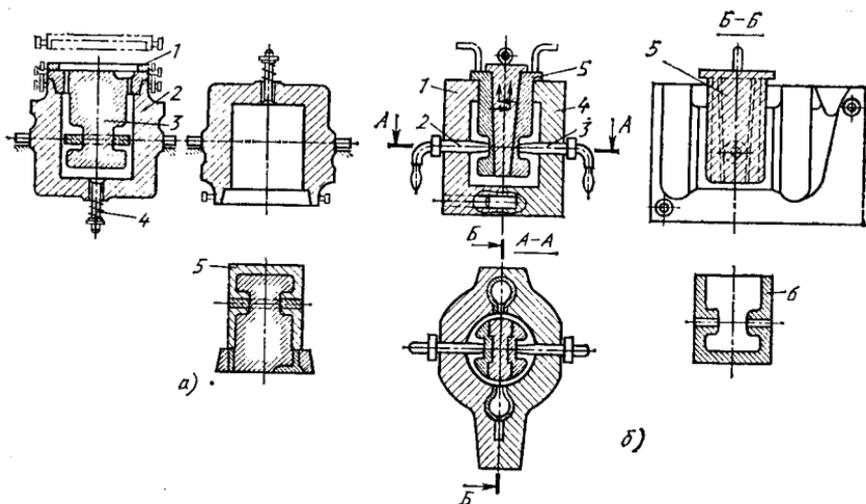


Рис. 102. Кокили:

a — неразъемный с песчаным стержнем; 1 — крышка; 2 — корпус; 3 — стержень; 4 — выталкиватель; 5 — отливка со стержнем; *b* — разъемный с металлическим стержнем; 1 и 4 — половины кокиля; 2 и 3 — боковые стержни; 5 — центральной составной стержень; 6 — отливка

Время от начала заливки кокиля до удаления отливки и продолжительность подготовки кокиля к очередной заливке составляет продолжительность одного цикла. Как правило, оптимальную температуру кокиля поддерживают изменением продолжительности цикла.

В кокиле можно получать простые отливки без полостей (слитки, валки) и фасонные отливки со сложными полостями и отверстиями.

Кокили могут быть неразъемными (вытряхными) и разъемными (рис. 102). Последние делают с вертикальной, горизонтальной или наклонной поверхностями разреза. Полости в отливках оформляются песчаными, оболочковыми или металлическими стержнями. Песчаные стержни применяют преимущественно для получения чугуновых и стальных отливок, металлические — для отливок из цветных сплавов (алюминиевых, магниевых).

Металлические стержни удаляют из отливки до ее извлечения из кокиля, после образования достаточно прочной корки твердого металла. Для извлечения сложного металлического стержня его делают составным, например, центральной стержень 5 поршня (рис. 102, б) состоит из трех частей. К концу затвердевания отливки прежде всего удаляют среднюю часть стержня 5, называемую клином, затем боковые, после чего удаляют стержни 2 и 3, раскрывают кокиль и извлекают отливку 6.

Для выхода воздуха из полости кокильной формы во время заливки предусматривают выборы, вентиляционные риски по плоскости разреза или венты.

Кокили обычно заполняют через расширяющиеся литниковые системы, которые рассчитывают так же, как и для песчаных форм. Литниковые каналы покрывают более толстым слоем краски (до 1 мм), чтобы уменьшить охлаждение в них сплава, а также снизить температуру рабочей поверхности кокиля у литников и повысить его долговечность. Прибыли утепляют, чтобы увеличить время их затвердевания: при литье алюминиевых и магниевых сплавов поверхность кокиля, формирующую прибыль, покрывают более толстым слоем краски, чем рабочую поверхность полости кокиля. При литье чугуна и стали прибыли выполняют в стержнях.

Особенности способа и области его применения. Интенсивность теплообмена между отливкой и кокилем в 3—5 раз выше, чем между отливкой и разовой фор-

мой, поэтому отливки получаются с более плотной мелкозернистой структурой, что существенно повышает свойства магниевых и алюминиевых сплавов. Вместе с тем в кокилях трудно получать тонкостенные отливки. Чугунные отливки, как правило, получают с обеленным поверхностным слоем, высокими внутренними напряжениями, поэтому их необходимо отжигать.

В кокилях трудно изготовлять сложные стальные отливки ввиду значительной усадки литейных сталей, практически полного отсутствия податливости формы, высокой интенсивности охлаждения и других факторов, вызывающих возрастание вероятности образования трещин. Кроме того, изготовление стальных отливок, особенно крупных, в металлических формах не всегда экономически оправдано из-за низкой стойкости кокилей. При изготовлении стальных отливок кокили выдерживают не более десятков и сотен заливок. Это на два-три порядка меньше кратности использования кокилей при производстве отливок из алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов.

Трудоёмкость изготовления отливок в кокилях меньше, чем при литье в разовые формы, качество поверхности и точность размеров отливок выше, припуски на обработку меньше, условия труда лучше. В механизированных кокильных цехах изготавливают чугунные и стальные отливки массой до 160 кг и из цветных сплавов до 30 кг, в немеханизированных — соответственно до 14 и 0,5 т. В кокилях можно получить чугунные прокатные валки с обеленным твердым износостойким поверхностным слоем, а также плотные без рыллот с повышенными свойствами отливки из алюминиевых сплавов с широким интервалом температуры затвердевания. При оценке целесообразности изготовления отливок литьем в кокиль учитывают затраты на изготовление детали с учетом стоимости кокиля, потерь металла в виде стружки и трудоёмкости механической обработки. Этот способ литья целесообразно применять в массовом и крупносерийном производстве, когда партия составляет не менее 300 мелких и 20 крупных отливок.

При литье стали и чугуна решающее значение имеет метод изготовления кокиля, который определяет его стоимость. Наиболее точные кокили изготавливают механической обработкой. Их применяют для литья алюминиевых и магниевых сплавов. Такие кокили дорогие. Для литья чугуна и стали используют литье, более дешёвые, хотя и менее точные чугунные кокили с минимальной механической обработкой или без нее.

С целью снижения трудоёмкости изготовления и повышения стойкости кокили облицовывают слоем плакированной песчаной смеси, отверждаемой при нагреве. Для этого применяют нагреваемую модель. Модель точно, а внутренняя поверхность кокиля лишь приблизительно воспроизводят очертания отливки.

В зазор между моделью и кокилем, нагретыми до 250 °С, вдувают смесь. После отверждения слой смеси толщиной 5—15 мм остается на кокиле. После изготовления отливки остатки облицовочного слоя удаляют дробеструйной обработкой и на кокиле формируют новый слой. Облицованные кокили применяют при производстве чугунных и стальных отливок. Литье в облицованные кокили сочетает достоинства способов литья в оболочковые формы и кокили, преимущество этого способа растёт с увеличением размеров изготавливаемой отливки.

§ 4. ЛИТЬЕ ПОД ДАВЛЕНИЕМ

При литье под давлением металлическая форма, называемая пресс-формой, заполняется расплавом под действием внешней силы, превосходящей силу тяжести, а затвердевание в ней отливки происходит под избыточным давлением. Последнее создают с помощью поршня в камере прессования, которая соединена с полостью пресс-формы.

Технология литья под давлением отличается коротким циклом, включает мало операций, но реализация их возможна только с применением специальных машин. По устройству узла прессования их классифицируют на три типа: с холодной горизонтальной, с холодной вертикальной и с горячей вертикальной камерами прессования.

В машинах с холодной горизонтальной камерой прессования (рис. 103, а) пресс-форма состоит из неподвижной 2 и подвижной 4 полуформ. Первая прикреп-

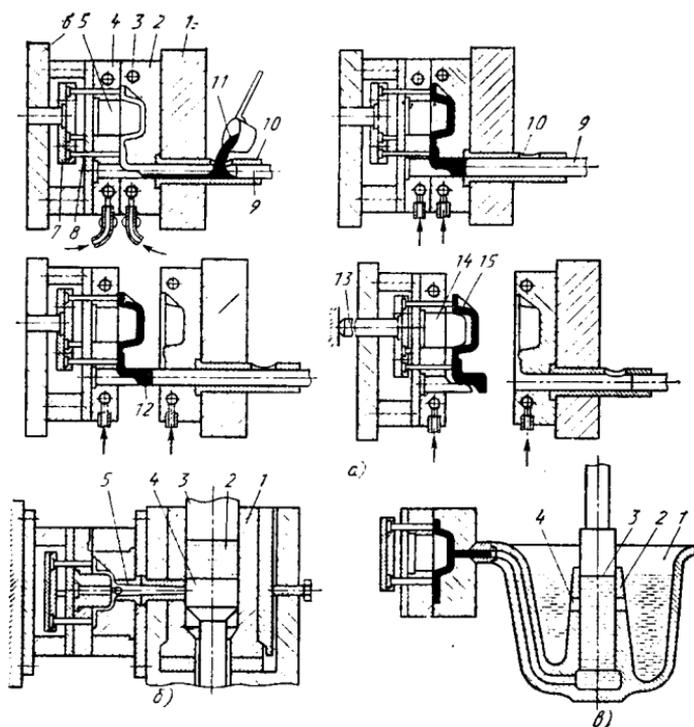


Рис. 103. Машины для литья под давлением

лена к неподвижной плите 1 машины, а подвижная — к подвижной плите 6. Пресс-формы могут иметь каналы 3 для водяного охлаждения. Металлические стержни 5 для образования полостей и отверстий в отливках находятся, как правило, в подвижной полуформе. Для извлечения отливки из формы предусмотрены выталкиватели 8, которые жестко закреплены в специальной плите 7.

Рабочую поверхность пресс-формы покрывают защитной смазывающей жидкостью и затем подвижную полуформу прижимают к неподвижной с помощью запорного механизма машины. После этого в цилиндр 10, называемый камерой прессования, через отверстие заливают порцию расплава 11 и включают механизм прессования. Плунжер 9 перекрывает заливочное отверстие и создает давление в камере. Слив через тонкий (0,1—0,3 мм) щелевой питатель заполняет полость пресс-формы со скоростью 0,5—120 м/с и затвердевает при давлении прессования 30—300 МПа. Как только отливка затвердеет, отводят подвижную часть пресс-формы вместе с отливкой. При отводе подвижной части формы движется и плунжер, который из камеры прессования выталкивает пресс-остаток 12. Плита толкателей перемещается вместе с пресс-формой до упора 13. Упор останавливает плиту толкателей, а пресс-форма продолжает перемещаться. Выталкиватели снимают отливку 15 со стержня 14. В этот момент ее подхватывает манипулятор и устанавливает на пресс для обрезки литников и заливок. Пресс-форму обдувают сжатым воздухом, смазывают рабочую поверхность, и цикл изготовления отливки повторяется.

В машинах с холодной вертикальной камерой прессования (рис. 103, б) пресс-формы устроены так же, как в машинах первого типа. В смазанную вертикальную камеру прессования 1 заливают дозу расплава 2. При движении вниз плунжер 3 давит на расплав, перемещает вниз пята 4, в результате чего открывается отверстие 5, соединяющее камеру с полостью пресс-формы, после заполнения

которой плунжер поднимается, а специальный механизм поднимает пята. Пята отрезает литник, поднимает пресс-остаток. Все другие операции выполняют, как в машинах первого типа. Машины с холодной горизонтальной камерой давления на 10—20 % производительнее и проще в обслуживании, чем с вертикальной.

Машины с горячей вертикальной камерой прессования (рис. 103, в) имеют печь с тиглем 1, в котором сплав поддерживают в жидком состоянии. Камера 2 составляет одно целое с чугуниным тиглем 1, находящимся в печи. Когда плунжер 3 поднят, через отверстие 4 камера заполняется сплавом. При движении плунжера вниз он перекрывает отверстие в камере, и расплав под давлением заполняет пресс-форму.

Преимущество этих машин — отсутствие ручных операций дозирования и заливки. Они выполняются автоматически при каждом цикле перемещения плунжера в камере прессования, поэтому их производительность высока и достигает на малых автоматических машинах 1000—3600 запрессовок в час. Машины с холодной камерой прессования применяют для получения отливок из алюминиевых, магниевых и медных сплавов, а также стали и чугуна; с горячей камерой — для получения отливок из цинковых сплавов.

Особенности способа и области его применения обусловлены условиями заполнения пресс-форм и питания отливок. Сплав заполняет пресс-форму за доли секунды (0,01—0,6 с) при скорости до 120 м/с. При такой скорости поступления металла в форму он сильно фонтанирует, ударяется о стенки формы и в течение 0,003—0,004 с закупоривает вентиляционные каналы. Только часть (10—30 %) газа — воздух и пар от смазывающего материала — удаляются из полости формы, образуется воздушно-металлическая эмульсия, которая затем затвердевает. Вследствие этого полученные отливки имеют специфический дефект — газовую пористость, низкие плотность, механические и особенно пластические свойства. Их нельзя подвергать термической обработке, так как при нагреве поверхность вспучивается вследствие расширения газа в порах.

В момент окончания заполнения полости формы движущийся с большой скоростью сплав мгновенно останавливается. Энергия движения потока преобразуется в энергию давления, которое мгновенно повышается. Происходит гидравлический удар, действующий в течение весьма короткого времени. Мгновенно повышающееся давление прижимает металл к рабочей поверхности пресс-формы и способствует четкому оформлению конфигурации отливки, чеканит ее. Отливка точно воспроизводит конфигурацию полости пресс-формы. Получаются точные с гладкой поверхностью тонкостенные (0,8—6 мм) отливки. Кроме того, благодаря тесному контакту между пресс-формой и отливкой увеличивается интенсивность теплообмена, уменьшается время затвердевания последней. Вследствие гидравлического удара поверхностный слой (0,02—0,2 мм) отливок получается плотным, без газовой пористости, пузырьки газа остаются во внутренних сечениях отливки.

Однако под действием гидравлического удара подвижная часть пресс-формы всегда немного отходит от неподвижной. Между полуформами образуется зазор, через который может происходить разбрызгивание металла. Отливки имеют зазоры по разьему пресс-форм, которые необходимо затем удалять. Снижается точность отливок в направлении, перпендикулярном разьему пресс-формы. Во избежание разбрызгивания в машинах предусматривают мощные запирающие устройства. Величина запирающего усилия является главной характеристикой машин литья под давлением. В малых машинах она не превышает 2 МН, в средних составляет 2—6 МН, в больших достигает 30 МН.

Совершенствование этого исключительно прогрессивного по точности и производительности способа литья направлено на предупреждение образования газовой и усадочной пористости. Известны следующие направления:

вакууммирование полости пресс-формы, а также сплава, поскольку воздушная пористость является главным дефектом отливок;

применение толстых питателей вместо тонких щелевых, чтобы они затвердели позднее отливки и питание ее осуществлялось под давлением прессующего плунжера;

совместное использование первого и второго направлений;

заполнение полости формы кислородом, после вытеснения воздуха, перед самым началом заливки (способ А. А. Рыжикова).

Весь кислород расходуется на окисление расплава с образованием очень малого по объему количества оксидов, исчезает источник образования газовой пористости — азот. При этом применяют негасотворные смазывающие материалы для пресс-форм и камеры прессования. Последнее направление используют при производстве алюминиевого литья.

Литьем под давлением получают сложные тонкостенные отливки из сплавов цветных металлов массой от нескольких граммов до десятков килограммов с высокой точностью размеров, с гладкой и чистой поверхностью. Переход на литье под давлением снижает трудоемкость изготовления отливок в литейных цехах в 10—12 раз, в механических в 5—8 раз.

Этот способ стал главным способом получения отливок из алюминиевых, магниевых и цинковых сплавов в массовом производстве, например деталей карбюраторов, алюминиевых блоков автомобильных цилиндров, латунных деталей сантехнической арматуры и др. В этих областях литье под давлением вытесняет литье в кокиль. В настоящее время осваивают литье сталей и чугуна под давлением.

Стоимость пресс-формы в 3—5 раз выше стоимости кокиля, что необходимо учитывать при выборе экономически выгодного в данных условиях способа.

§ 5. ЦЕНТРОБЕЖНОЕ ЛИТЬЕ

При центробежном литье заполнение формы жидким металлом, его затвердевание и последующее частичное остывание происходит в поле действия центробежных сил. Такое поле возникает при вращении литейной формы вокруг горизонтальной, вертикальной или наклонной оси. Центр массы отливки может находиться на оси вращения формы или в стороне от нее. Внутренняя поверхность отливки при центробежном литье в отдельных случаях формируется без непосредственного контакта с литейной формой и без стержней. Такую поверхность называют свободной.

Технология центробежного литья основана на вращении формы, ее особенностями обусловлены использованием центробежной силы при выполнении обычных операций изготовления отливок: подготовке форм, заливке и выдержке отливок в форме для затвердевания и частичного охлаждения.

При центробежном литье применяют разнообразные литейные формы, но наиболее часто используют металлические изложницы. Их предварительно подогревают (охлаждают) до 300 °С, затем на рабочую поверхность наносят огнеупорное покрытие. Это повышает стойкость изложницы, снижает скорость охлаждения отливки, предупреждает образование спаев и трещин. Покрытие может содержать модифицирующие и легирующие добавки, в этом случае оно служит также для регулирования структуры и состава поверхностных слоев отливки. Покрытие наносят на изложницу в виде красок, облицовок из сыпучих материалов. Последние применяют при изготовлении цилиндрических отливок (труб, втулок, гильз и т. д.) в формах, вращающихся вокруг горизонтальной оси, совпадающей с осью отливки (рис. 104, а, схема 1). Сыпучие материалы засыпают во вращающуюся форму, мелкодисперсный материал покрытия удерживается на поверхности формы центробежными силами.

Во вращающуюся форму через специальный желоб заливают жидкий металл. Под действием центробежной силы, во много раз превышающей силу тяжести, расплав заполняет полость литейной формы и затвердевает. После затвердевания и частичного остывания отливки вращение формы прекращают, горячую отливку извлекают и в дальнейшем ее охлаждают на воздухе или в охлаждающей камере. При необходимости отливки подвергают термической обработке.

При центробежном литье важным фактором управления технологическим процессом является скорость (частота) вращения формы. Ее определяют из условия $F_{ц} = KF_T$, где $F_{ц}$ и F_T — соответственно центробежная сила и сила тяжести; K — гравитационный коэффициент. Подставив в равенство выражения для $F_{ц} = m\omega^2 r_0$; $\omega = 2\pi n/60$ и $F_T = mg$, находим частоту вращения формы:

$$n = 30 \sqrt{Kg/r_0}/\pi,$$

где r_0 — радиус внутренней поверхности отливки.

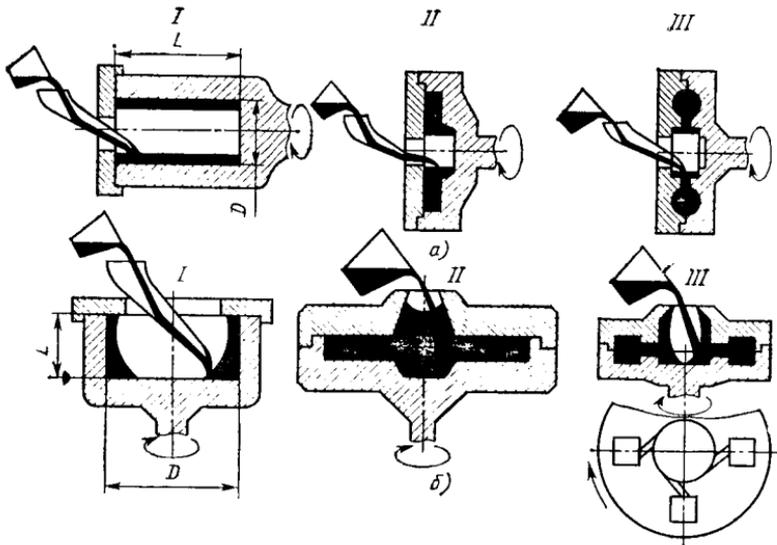


Рис. 104. Схемы центробежного литья

Значение K для различных условий литья колеблется от 3,3 до 300. Действие центробежной силы эквивалентно действию в K раз большей силы тяжести. Это равносильно увеличению плотности расплава в K раз, поэтому плотность расплава в поле центробежных сил называют эффективной. При изготовлении отливок со свободной поверхностью эффективная плотность у свободной поверхности должна составлять 200 000—300 000 кг/м³ (верхнее значение для толстостенных отливок). Гравитационный коэффициент численно равен отношению эффективной плотности к плотности неподвижного расплава: $K = \rho_{\text{эф}}/\rho$.

Из этих предпосылок Л. С. Константиновым была получена формула для частоты вращения формы:

$$n = 300 \sqrt{\rho_{\text{эф}}/(\rho r_0)} = 5520/\sqrt{\rho r_0}, \quad (21)$$

где ρ и r_0 имеют размерность соответственно г/см³ и см.

При литье в форму с вертикальной осью вращения (рис. 104, б, схема I) значение n , вычисленное по формуле (21), сравнивают со значением n' , определенным из условия получения допустимой разностенности по высоте отливки, и выбирают наибольшее. Свободная поверхность в этом случае представляет собой параболоид вращения, поэтому координаты по оси вращения в верхнем $Z_{\text{В}}$ и нижнем $Z_{\text{Н}}$ сечениях связаны с соответствующими радиусами $r_{\text{В}}$ и $r_{\text{Н}}$: $Z_{\text{В}} = \omega^2 r_{\text{В}}^2 / (2g)$; $Z_{\text{Н}} = \omega^2 r_{\text{Н}}^2 / (2g)$. Высота отливки $h = Z_{\text{В}} - Z_{\text{Н}} = \omega^2 (r_{\text{В}}^2 - r_{\text{Н}}^2) / (2g)$. Из этой зависимости находим частоту вращения, обеспечивающую допустимую разностенность,

$$n' = 30 \sqrt{2gh / (r_{\text{В}}^2 - r_{\text{Н}}^2)} \Big| \pi,$$

где h — высота отливки.

Схемы II и III на рис. 104 применяют при необходимости существенного повышения плотности отливок или изготовления тонкостенных отливок из сплавов с низкой жидкотекучестью. Таким образом получают гребные винты, отливки из жаропрочных и титановых сплавов.

Особенности способа и области его применения. Центробежные силы улучшают заполнение форм жидким металлом и ускоряют седиментацию газовых пузырьков и неметаллических включений. Менее плотные, чем расплав, включе-

ния выносятся на внутреннюю поверхность отливки, а более плотные скапливаются у наружной поверхности.

При получении полых отливок расплав остывает с двух сторон: с наружной (отдает теплоту форме) и свободной (за счет теплоизлучения в воздух) поверхностей. В средних слоях находится более горячий и потому менее плотный расплав. Охлажденный на свободной поверхности расплав, как более плотный, устремляется под действием центробежных сил к наружной поверхности (стенке формы) и вытесняет горячий расплав из среднего слоя в обратном направлении, к свободной поверхности. Это создает благоприятные условия для направленного затвердевания. Для усиления этого эффекта свободную поверхность покрывают теплоизолирующим шлаком. В этом случае у свободной поверхности расплав кристаллизуется в последнюю очередь, и затвердевание идет строго направленно.

Повышенное в K раз давление в металле, которое возникает под действием центробежной силы, способствует устранению в отливках пористости. Это обусловлено улучшением питания отливок и уменьшением газовыделения из металла в период его затвердевания. По мере удаления от оси вращения центробежная сила возрастает, соответственно повышается плотность металла отливки. Из-за повышенного давления расплава тормозится усадка и уменьшается воздушный зазор между отливкой и формой, поэтому при центробежном литье отливка затвердевает и остывает быстрее, чем в неподвижной форме. Конвективное перемешивание металла в период кристаллизации и быстрое охлаждение способствуют измельчению структуры отливки.

Вместе с тем действие центробежных сил в определенной мере затрудняет получение качественных отливок. Так, химическая неоднородность по сечению отливки при этом способе литья усиливается по мере увеличения скорости вращения формы. В чугунных и стальных отливках сильнее ликвация углерода, серы и фосфора, которые вытесняются к внутренней поверхности. При литье свинцовой бронзы внутренняя поверхность отливки обогащается медью, а наружная — более плотным свинцом. Из расплава заэвтектического силумина при кристаллизации сначала выделяются более легкие первичные кристаллы кремния. Скапливаясь у свободной поверхности и образуя затвердевший слой, они нарушают направленность затвердевания. Отливка получается не только неоднородной по составу, но и с усадочными дефектами.

При литье в песчаные формы центробежная сила за счет увеличения давления расплава способствует проникновению его в межзеренные каналы и формированию механического пригара. При недостаточной прочности форма под давлением жидкого металла деформируется, и отливка получается с подутостью. При центробежном литье в твердой корке, образующейся у поверхности формы, развиваются более высокие внутренние напряжения, поэтому более вероятно образование горячих трещин.

Наибольшее распространение центробежное литье нашло при производстве полых отливок (см. рис. 104, схема 1). В формах с горизонтальной осью вращения получают протяженные отливки с $L > 3D$ (L и D — соответственно длина и диаметр отливки): чугунные водопроводные (напорные) трубы диаметром до 300 мм, чугунные канализационные (сливные) трубы диаметром до 1800 мм, гильзы автомобильных и тракторных двигателей из легированного чугуна, стальные заготовки для подшипников качения и др. В формах с вертикальной осью вращения получают короткие тела вращения с $L < 3D$. При производстве отливок центробежным литьем не требуются стержни, не расходует металл на литниковую систему. Выход годного литья достигает 90—95 %, себестоимость снижается на 20—30 %. Производительность труда выше, условия лучше, чем при литье в разовые песчаные формы.

На рис. 105 приведена схема получения чугунной трубы в изложнице, вращающейся вокруг оси с углом наклона к горизонту $3-4^\circ$. Электродвигатель 1 через передачу вращает изложницу 2, помещенную в наполненный циркулирующей водой кожух 3 (рис. 105, а). Центробежная машина вместе с изложницей может перемещаться по рельсовому пути. Заливочный желоб 4 неподвижен. Жидкий чугун из мерного ковша 5 начинает заполнять изложницу в крайнем правом положении машины. Машина с изложницей постепенно перемещается влево (рис. 105, б) и к концу заливки занимает крайнее левое положение (рис. 105, в).

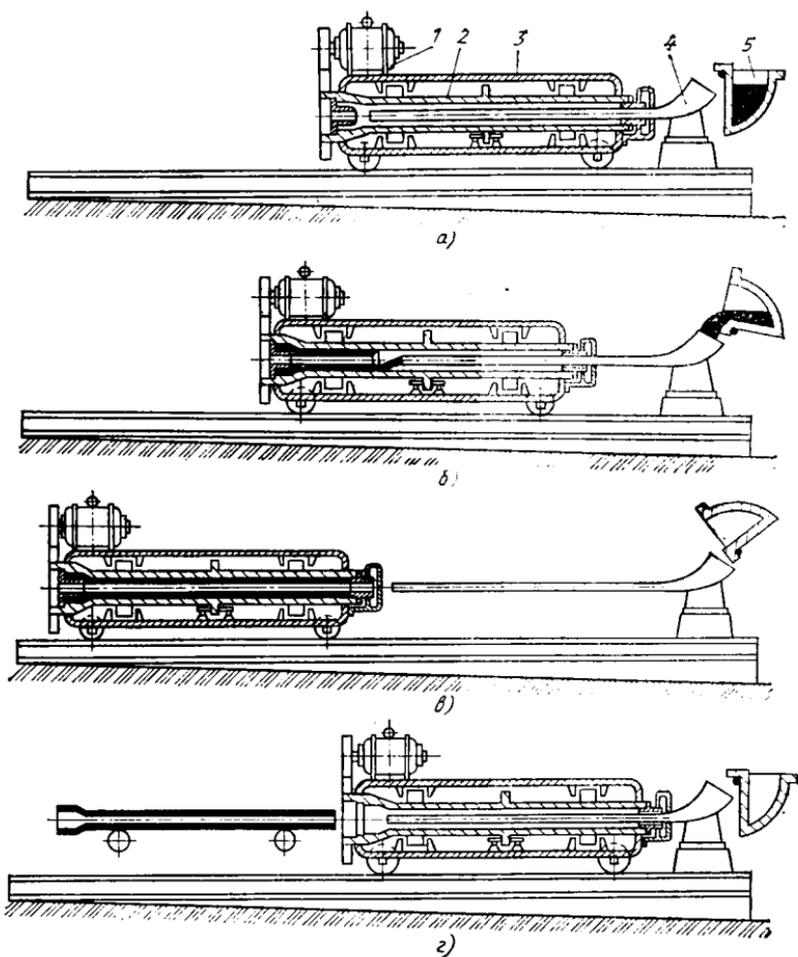


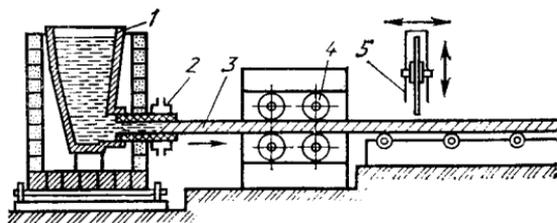
Рис. 105. Схема получения чугунной трубы центробежным литьем

При возвращении машины в исходное положение специальные клещи извлекают горячую трубу (рис. 105, г). Для литья труб применяют также центробежную машину другой конструкции, в которой перемещается не машина с изложницей, а заливочный желоб с мерным ковшем. Производительность центробежных труболитейных машин 40—50 труб в час при внутреннем диаметре труб 200—300 и длине до 6000 мм. Чугунные трубы, изготавливаемые в металлических формах, имеют отбеленный слой глубиной до 3 мм, а также высокие внутренние напряжения, поэтому расплав чугуна модифицируют, а полученные трубы отжигают для устранения отбела и снятия внутренних напряжений.

§ 6. НЕПРЕРЫВНОЕ И ПОЛУНЕПРЕРЫВНОЕ ЛИТЬЕ

Непрерывное литье — это способ получения протяженных отливок постоянного поперечного сечения путем непрерывной подачи расплава в форму и вытягивания из нее затвердевшей части отливки. Если непрерывность подачи

Рис. 106. Схема горизонтального литья



расплава в кристаллизатор ограничена по времени (массе), то способ литья называют полунепрерывным. Длина вытягиваемой отливки в этом случае соответственно ограничена. В зависимости от направления вытягивания отливки различают вертикальное и горизонтальное непрерывное (полунепрерывное) литье.

Технология непрерывного литья предусматривает использование специальной литейной формы — кристаллизатора и включает операции, выполняемые непрерывно и периодически.

Кристаллизатор имеет внутреннюю полость, профиль которой соответствует поперечному сечению отливки. Рабочую часть кристаллизатора, контактирующую с металлом, выполняют из меди, твердых алюминиевых сплавов, стали или графита. Обычно ее охлаждают водой. Выбор материала и протяженности (длины или высоты) кристаллизатора зависит от теплопроводности заливаемого сплава, склонности его к образованию трещин и размеров поперечного сечения отливки. При получении чугунных отливок учитывают также возможность образования отбеленного слоя. Высокотеплопроводные алюминиевые и медные сплавы льют в короткие (не более 300 мм), а стали и чугуны в длинные (1000—1500 мм) кристаллизаторы. Для получения отливок с внутренними полостями в кристаллизатор устанавливают стержень соответствующего сечения.

Расплавы в кристаллизатор 2 подают из ковша или из раздаточной печи 1 (рис. 106). Затвердевшую часть отливки 3 вытягивают из кристаллизатора тянущими роликами 4 и периодически разрезают пилами или резаками 5 на заготовки необходимой длины. Обычно режим вытяжки прерывистый. Так, при непрерывном литье чугуна продолжительность вытягивания и последующей остановки составляет соответственно 1—10 и 2—20 с, а скорость вытягивания 0,2—2 м/мин.

При полунепрерывном литье из кристаллизатора за один цикл вытягивают отливку требуемой длины, затем подачу расплава в кристаллизатор временно прекращают и возобновляют после удаления предыдущей отливки и подготовки к приему новой.

Особенности способа и области его применения. При непрерывном литье в кристаллизаторе ограниченной протяженности получают отливки или литые заготовки неограниченной длины. В полости кристаллизатора в его различных частях одновременно происходит охлаждение расплава, затвердевание и охлаждение отливки, причем все ее части последовательно проходят одни и те же зоны кристаллизатора и формируются в одинаковых условиях. Это обеспечивает однородность свойств отливки по длине.

Высокий градиент температур по сечению отливки внутри кристаллизатора и постоянное пополнение расплава в его полости создают предпосылки для направленного затвердевания и непрерывного питания отливки, поэтому отливки получаются плотными.

Особенностью этого способа является также извлечение из формы (вытягивание из кристаллизатора) отливки до ее полного затвердевания. Оно заканчивается вне кристаллизатора в условиях естественного или искусственного охлаждения, например водой, что позволяет повышать производительность труда.

Непрерывным и полунепрерывным литьем получают отливки и литые заготовки постоянного сечения в виде круга, многогранников, полосы, уголка, других сложных профилей, с внутренними полостями и т. д.

Рассматриваемый способ характеризуется высоким выходом годного литья, так как отсутствуют литниковая система и прибыли, повышенными плотностью, точностью и чистой поверхностью отливок, низкими удельными расходами на

изготовление форм, полным исключением операций выбивки форм, обрубки и очистки отливок, улучшенными условиями труда и меньшим загрязнением окружающей среды вследствие исключения из технологического процесса формовочных и стержневых смесей.

Недостатками непрерывного (полунепрерывного) литья являются невозможность изготовления отливок сложной конфигурации, ограниченная номенклатура отливок и заготовок.

Непрерывным и полунепрерывным литьем получают слитки из различных сплавов для последующей прокатки, проволочные заготовки, чугунные трубы диаметром до 1000, толщиной до 50 мм и втулки для гильз дизелей, направляющие станины металлорежущих станков, заготовки для гаек, шестерен, корпусов гидро- и пневмоаппаратуры, прокатных валков и др.

§ 7. ЭЛЕКТРОШЛАКОВОЕ ЛИТЬЕ

Электрошлаковое литье — способ получения отливок в водоохлаждаемой металлической форме путем приготовления жидкого металла непосредственно в ее полости методом электрошлакового переплава расходоуемого электрода.

Технология электрошлакового литья отличается тем, что операции приготовления расплава, заливки и выдержки отливки в форме совмещены по месту и времени.

В электрошлаковом литье водоохлаждаемую металлическую форму называют кристаллизатором, ее полость соответствует конфигурации отливки или ее части, если за один цикл получают не всю отливку. Расходуемый электрод имеет близкий или одинаковый с отливкой химический состав. В качестве шлака используют фторид кальция или составы на его основе.

В медный кристаллизатор заливают предварительно расплавленный шлак, в него погружают нижние концы электродов и через систему кристаллизатор — шлак — электрод пропускают электрический ток напряжением 45—60 В и силой около 20 А на 1 мм диаметра электрода. Высокое электрическое сопротивление шлака обеспечивает преимущественное выделение теплоты в слое шлака и его разогрев на 200—300 °С выше температуры плавления сплава. Часть электрода, погруженная в шлак, постепенно оплавляется, и жидкий металл в виде отдельных капель, проходя через слой шлака, скапливается под ним и образует металлическую ванну в виде небольшой лунки. Слой расплава, расположенный ближе к кристаллизатору, затвердевает. За счет оплавления электрода металлическая ванна сверху непрерывно пополняется новыми порциями расплава, а снизу она намораживается в кристаллизаторе. Фронт затвердевания отливки вместе со шлаковой ванной постепенно перемещается вверх. Расход электродов компенсируют их перемещением в вертикальном направлении. Внутренние полости в отливках выполняют с помощью водоохлаждаемых металлических стержней.

Особенности способа и области его применения. При электрошлаковом литье кристаллизатор служит для приготовления расплава и формирования отливки.

В литейной форме одновременно происходит расплавление металла и его рафинирование, возможно также модифицирование расплава магнием и кальцием за счет их восстановления из шлака. Рафинирование от серы, газов и неметаллических включений обеспечивается в результате капельного переноса жидкого металла через слой шлакового расплава. Отливка формируется путем намораживания расплава в кристаллизаторе. Намерзающие слои металла непрерывно питаются расплавом из металлической ванны, поэтому отливки получают плотными без порывов. Вследствие последовательного оплавления и намерзания небольших порций металла в отливке отсутствует ликвационная неоднородность. Высокий градиент температуры между границей шлак—металл и фронтом затвердевания обуславливает образование столбчатых кристаллов.

Повышенная плотность металла, его чистота (по содержанию вредных примесей и неметаллических включений) обеспечивают высокие механические свойства отливок.

Вследствие затекания жидкого шлака в зазор между кристаллизатором и формирующейся отливкой поверхность последней получается гладкой и чистой.

При электрошлаковом литье исключаются многие технологические операции изготовления отливок, не используются специальные плавильные агрегаты, формовочные и стержневые смеси; отливки получают без литниковых систем и прибылей, с чистой и гладкой поверхностью; возможно изготовление отливок с высокими механическими свойствами и массой до 300 т. Этот способ отличает высокий выход годного литья, снижение объема механической обработки отливок, уменьшение трудоемкости их изготовления. Способ успешно конкурирует с ковкой, штамповкой и сваркой при изготовлении ответственных деталей. Электрошлаковым литьем получают прокатные валки, бандажи цементных печей диаметром до 6 м и массой 100—150 т, сосуды работающие, под сверхвысоким давлением, коленчатые валы и шатуны судовых двигателей, ответственные детали арматуры тепловых и атомных электростанций, отливки роторов мощных турбогенераторов и др.

ГЛАВА 13 ОТЛИВКИ ДЛЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Современное металлургическое предприятие является не только крупномасштабным, но и высокомеханизированным и автоматизированным, объединяющим различные производства от подготовки рудного сырья до готового проката. Другой отличительной чертой современных предприятий черной металлургии, обуславливающей современное использование разнообразных машин и механизмов, является их оснащение агрегатами большой единичной мощности.

В различных подъемно-транспортных машинах и технологическом оборудовании, значительная часть которого работает в тяжелых условиях, многие детали необходимо периодически заменять. В большинстве случаев заготовки для них отливают на ремонтных базах горно-обогатительных и металлургических комбинатов (заводов), в составе которых имеются литейные цехи. Большая часть этих сменных деталей представляет собой обычные машиностроительные отливки, производство которых рассмотрено в предыдущих главах. Однако часть сменного оборудования, прежде всего прокатные валки и изложницы, в силу предъявляемых к ним специфических требований характеризуются определенными особенностями производства.

§ 1. ПРОКАТНЫЕ ВАЛКИ

Прокатные металлургические валки, как правило, изготовляют литыми. Разнообразные условия их службы (тип клетки и стана, положение в стане, прокатываемый сплав, вид продукции и т. д.) обуславливают как конструкцию валка, так и выбор литейного сплава, из которого его изготовляют. Однако все валки должны иметь износо- и термостойкий рабочий слой, вязкую

прочную сердцевину и шейки. Валки подразделяют по назначению (листопрокатные и сортопрокатные), конструкции (гладкие и калиброванные), роду металла (чугуны, стали легированные и не легированные), макростроению (полутвердые, отбеленные, двухслойные). Перечисление классификационных признаков можно было бы продолжить, но приведенные являются основными.

Литые стальные валки изготовляют из нелегированных и легированных сталей, содержащих 0,4—2 % углерода. В зависимости от концентрации углерода и легирующих элементов структура этих сталей изменяется от перлитно-ферритной до перлитной с включениями карбидной фазы. Валки из доэвтектоидных сталей имеют низкую износостойкость, но хорошо выдерживают ударные нагрузки. Валки из заэвтектоидных более твердых сталей подвергают сложной термообработке в целях размельчения карбидов, их сфероидизации для повышения вязкости стали.

Наиболее широко распространены литые валки из различных чугунов. Применение именно этого сплава позволяет получать изделия, сочетающие высокую твердость и износостойкость рабочего слоя (валки с отбеленной поверхностью) с достаточно прочной сердцевиной. В России отливки валков с отбеленной поверхностью впервые были осуществлены в 1812 г. на Олонецких заводах.

Вследствие большой чувствительности чугунов к скорости охлаждения, их структура и механические свойства существенно изменяются от поверхности к середине. По структуре сечение валка можно разбить на три зоны: наружную из белого чугуна (перлит и цементит); переходную из половинчатого чугуна (перлит, цементит, графит) и сердцевину из серого чугуна, в котором отсутствуют включения структурно свободного цементита. Регулировать структуру и свойства можно, изменяя химсостав чугуна и скорость охлаждения валка.

Основная масса материала валка должна обеспечивать общую высокую механическую прочность, что может быть достигнуто методами и технологическими приемами, описанными в гл. 9. Важное значение наряду со структурой металлической матрицы чугуна имеет количество и форма графита. Общая прочность валка будет определяться размерами отбеленного слоя и переходной зоны. При значительном отбеленном слое возрастает опасность поломки; таким образом, для увеличения механической прочности желательно уменьшать слой отбела. Но для надлежащей износостойкости поверхность должна быть достаточно твердой. Основное влияние на износостойкость оказывают свойства чугуна в зоне чистого отбела и величина последнего. Твердость рабочего слоя с чистым отбелом составляет 58—65 *HSD*.

В переходной зоне металл будет более хрупким, чем в сердцевине, из-за наличия цементита, а на износостойкость эта зона практически не влияет. Поэтому для обеспечения износостойкости и эксплуатационной прочности валков с отбеленной поверхностью

целесообразно иметь переходную зону минимальных размеров. Показатель качества таких валков $A_n = x/(x + z)$, где x — глубина чистого отбела, z — толщина переходной зоны.

Глубина отбеленного слоя бочки листопркатных валков обычно составляет 10—32 мм. При меньшей глубине отбела сокращается срок службы ввиду износа, а при его увеличении возрастает опасность поломки. Главная причина состоит в том, что с увеличением толщины отбеленного слоя непропорционально повышается и глубина переходной зоны, снижающей общую прочность валка. Удовлетворительное качество валков соответствует значениям $A_n = 0,25 \div 0,45$. Листопркатные валки с чистым отбелом в рабочем слое применяют при получении холоднокатаного тонкого листа. В толстолистовых станах часто используют валки, поверхностная твердость которых может быть несколько ниже (50—55 *HSD*), что обеспечивается формированием поверхностного (рабочего) слоя, являющегося по структуре половинчатым чугуном (перлит, цементит и графит). В этом случае решающее значение имеет высокая механическая прочность валка, снижающая вероятность поломок.

В соответствии с изложенным в чугуне для валков с чистым отбелом содержится, %: 2,7—3,1 С, 0,4—0,6 Si, 0,3—0,5 Mn, 0,4—0,5 P, до 0,1 S. Половинчатый чугун в рабочем слое формируется при увеличении содержания кремния до 1 %. С целью повышения термостойкости и общей прочности валков чугун дополнительно легируют 0,3—0,5 % Mo. Кроме серого чугуна с пластинчатым графитом широко применяют чугун с шаровидным графитом. Из этого литейного сплава можно изготавливать валки с отбеленным слоем регламентированных размеров и валки со структурой половинчатого чугуна в рабочем слое. По составу применяемый высокопрочный чугун с шаровидным графитом является доэвтектическим, но концентрация углерода и кремния в нем более высокая (3,1—3,5 % С, 0,8—1,8 % Si).

Как уже отмечалось, износостойкость валков определяется твердостью отбеленного слоя, максимальное значение которой при использовании нелегированных чугунов достигает 70 *HSD*. Такую твердость можно получить у валков, диаметр бочки которых не превышает 500 мм. В связи с совершенствованием станов непрерывной и полунепрерывной прокатки потребовались более долговечные валки высокой твердости (90—95 *HSD*). Валки для этих станов отливают двуслойными. Наружный слой формируется из чугуна, легированного хромом, никелем, молибденом, а центральная зона — из серого чугуна. Получение двуслойных валков потребовало разработки специальной технологии.

Сортопркатные валки изготавливают из нелегированных чугунов с регламентированным (20—40 мм) отбеленным рабочим слоем и легированных со структурой половинчатых чугунов в рабочем слое. В качестве основных легирующих элементов применяют хром, никель, а для повышения термостойкости и прочности

используют молибден (0,3—0,6 %), ванадий (0,15—0,40 %) и медь (0,8—1,4 %).

Сортопрокатные валки отливаются как с гладкой бочкой, в которых калибры вытачивают посредством механической обработки, так и с литыми профилированными калибрами.

Изменение твердости сортопрокатных валков достигается изменением степени легирования чугуна и теплового сопротивления стенки литейной формы путем нанесения на нее слоя теплоизоляционной краски (обмазки).

Сортопрокатные валки из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом имеют более высокую прочность и износостойкость. Твердость чугуна от наружной поверхности к середине валка изменяется менее интенсивно, чем в валках из чугуна с пластинчатым графитом.

Заметное повышение износостойкости валков достигается применением высокохромистых чугунов, имеющих структуру тонкодисперсного перлита с равномерными включениями карбидов хрома или хромистой эвтектики.

В последнее время все шире применяют бандажированные валки, изготавливаемые как методом горячей посадки бандажа (бочки) на отдельно изготовленную ось, так и путем заливки чугуна в литейную форму с установленной в ней осью. Последний способ значительно проще, но требует специальных приемов, обеспечивающих протекание усадки бочки.

Как показано выше, для обеспечения долговечности практически всех типов металлургических валков их производят из отбеленного чугуна. Из многочисленных факторов, определяющих структуру чугуна валка, отметим лишь основные: химический состав сплава, режим его охлаждения в форме и условия подготовки сплава (шихтовые материалы, температурно-временная обработка и т. д.).

Из всех элементов, входящих в состав нелегированного чугуна, наиболее заметное влияние на отбеливаемость оказывают углерод и кремний. Эти элементы являются графитизаторами, и поэтому увеличение их концентрации вызывает уменьшение глубины отбеленной зоны.

Наряду с величиной отбела важна и другая его характеристика — твердость. Регулирование отбеливаемости углеродом является неудобным, так как повышенное содержание углерода снижает прочность сердцевины. Содержание углерода в чугуне для валков холодной прокатки, когда необходима высокая твердость поверхности, рекомендуется поддерживать в пределах 3—3,5 %. В чугуне для сортопрокатных валков, калибры которых вытачиваются, содержание углерода несколько ниже (2,7—3 %), что обеспечивает более высокие механические свойства сердцевины и большую глубину отбела. Глубокий слой отбела необходим, чтобы избежать его прорезания при механической обработке.

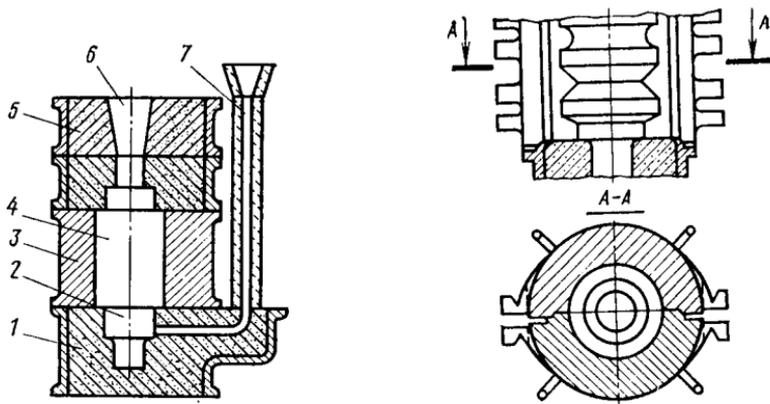


Рис. 107. Комбинированная форма для отливки листопрокатного вала с отбеленным слоем:

1 — нижняя песчаная полуформа шейки; 2 — шейка вала; 3 — цилиндрический кокиль бочки вала; 4 — бочка вала; 5 — верхняя песчаная полуформа; 6 — прибыль; 7 — стояк

Рис. 108. Профилированные разъемные кокили бочки вала

Кремний в отличие от углерода практически не влияет на твердость отбеленного слоя, поэтому глубину отбела удобнее регулировать изменением его концентрации. Содержание этого элемента в чугунах для валков составляет 0,4—1 % и только в чугунах с шаровидным графитом достигает 2 %.

Концентрацию серы и фосфора желательно иметь минимальной, их допустимое содержание обуславливается используемой шихтой и типом плавильного агрегата.

Скорость охлаждения отливок валков регулируют изменением толщины стенки кокиля и слоя нанесенной на него краски. Толщина стенки кокиля обычно составляет 0,2—0,23 диаметра бочки. Краска на кокиль наносится слоем 0,5—10 мм, толщину этого слоя регулируют специальными шаблонами.

Особенности изготовления литейных форм. Для отливки валков применяют комбинированные формы (рис. 107). В песчаных частях формы выполняют нижнюю и верхнюю шейки, прибыль и литниковую систему.

Формы шеек, элементов литниковой системы и прибылей изготавливают в специальных опоках по моделям, с помощью трамбовок, пескометов, пуансонно-шнековых машин. Все элементы формы окрашивают графитовыми красками. Кокили, в зависимости от конфигурации бочки вала, могут быть гладкими, сплошными цилиндрическими или профилированными разъемными (рис. 108).

Песчаные элементы формы сушатся при 300—400 °С, кокиль перед окраской и сборкой подогревают до 200—250 °С.

При отливке профилированных сортопрокатных валков во избежание образования внутренних напряжений и трещин кокили

необходимо делать разъемными, допускающими протекание усадки валка при охлаждении его в форме. Конструкция таких кокилей и технология отливки разработаны А. Е. Кривошеевым. Подвижность отдельных частей кокиля достигается установкой в процессе сборки деревянных прокладок, которые выгорают.

Для выплавки чугуна можно применять практически все известные типы плавильных агрегатов, обеспечивающие получение расплава необходимого состава, перегрева и использование крупногабаритной шихты. Более стабильные результаты и гибкость производства обеспечиваются в цехах, оборудованных дугowymi и индукционными печами. При отливке двуслойных валков необходимо иметь расплавы разных составов для наружного слоя и сердцевин. Отбеливаемость чугуна при выплавке его для валков проверяется по специальной технологической пробе. Этот метод является одним из основных методов оценки качества расплава.

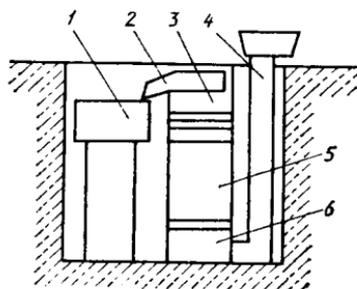
Технология получения двуслойных валков часто предусматривает промывку формы. Сначала ее полость заполняется чугуном, предназначенным для формирования рабочего слоя белого чугуна (легированного). После определенного времени форму промывают через ту же литниковую систему нелегированным (высококремнистым) чугуном, из которого формируют сердцевину валка, его шейки. Время начала промывки и ее продолжительность зависят от размеров валка. Чугун, которым промывают форму, вытесняет неуспешный затвердеть легированный чугун, и последний через желоб сливается в специальную емкость (рис. 109).

Другая технология получения двуслойных валков — полупромывка. В этом случае чугуном, предназначенным для формирования рабочего наружного слоя бочки валка, форма заливается не полностью — до уровня верхней по заливке шейки. По истечении времени, необходимого для затвердевания рабочего слоя, через ту же литниковую систему производится ступенчато (по 150—200 кг) доливка формы высококремнистым чугуном, который, смешиваясь с первоначально залитым, формирует центральную зону валка. По такой технологии изготовляют валки из чугуна с шаровидным графитом.

Продолжительность выдержки валка в форме определяется его размерами. Во избежание образования трещин температура бочки валка при выбивке не должна превышать 150 °С.

Рис. 109. Форма для получения двуслойных валков методом промывки:

1 — емкость для слива вытесняемого чугуна; 2 — сливной желоб; 3 — песчаная полуформа шейки и прибыли; 4 — стоек; 5 — кокиль бочки валка; 6 — песчаная полуформа шейки валка



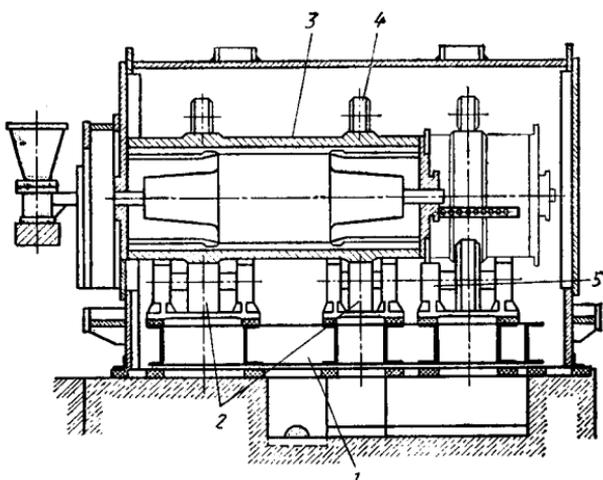


Рис. 110. Центробежная машина для отливки валков

Центробежный способ отливки валков в отличие от стационарного позволяет:

снизить расход легирующих элементов при производстве двухслойных валков, так как они расходуются в основном на получение рабочего слоя валка;

снизить общий расход металла на отливку на 15—20 % вследствие отсутствия литниковой системы и прибылей;

отливать без стержней многие типы пустотелых валков или бандажей для составных валков.

Для отливки валков применяют центробежные машины с горизонтальной, вертикальной и изменяющейся осями вращения.

На отечественных вальцелитейных заводах для отливки валков диаметром 200—450 и длиной 1100—2000 мм применяют роликовые центробежные машины с горизонтальной осью вращения (рис. 110). Машина смонтирована на стальной раме 1. На ролики 2 укладывают кокиль 3, на наружной поверхности которого имеются два выступающих концентрических пояска. Каждый поясок опирается на два ролика 2, а сверху прижимается третьим 4. Кокиль получает вращение от приводного ролика 5, соединенного клиноременной передачей с двигателем постоянного тока, с регулируемой частотой вращения. Снаружи кокиль охлаждается водой.

При отливке валков на центробежных машинах с изменяющейся осью вращения наружный рабочий слой валка формируют при горизонтальном вращении формы, а сердцевину — при наклонном и вертикальном вращении с меньшей частотой вращения. Такие машины нашли применение для отливки крупных листов и сортопрокатных валков.

§ 2. ПРОИЗВОДСТВО ИЗЛОЖНИЦ

Большая часть изложниц используется для получения слитков стали, предназначенных для последующей прокатки иковки.

Значительные объемы производства стали в СССР предопределили и большое потребление изложниц. Несмотря на все увеличивающееся внедрение непрерывных способов разлива, все же значительное количество стали будет разливаться в изложницы, например при получении крупнотоннажных слитков. Качество изложниц, продолжительность их службы определяют качество слитка и стоимость конечной продукции. Разнообразие конструкций, типоразмеров изложниц предъявляет существенные (иногда определяющие) требования к выбору материала и технологии их изготовления.

Анализ работы изложниц показывает, что основной причиной их выхода из строя является образование и развитие различных трещин. По этой причине выходит из строя ~90 % изложниц. А. А. Горшков предложил подразделить трещины на три рода.

Трещины первого рода возникают при резком одностороннем нагреве стенки. В изложнице они образуются во время заполнения сталью. Нагреваясь от последней с внутренней (рабочей) поверхности, чугун стремится расшириться, в результате чего в наружных, более холодных слоях стенки возникают растягивающие напряжения. Трещины первого рода проходят на всю глубину стенки и полностью разрушают изложницу.

Трещины второго рода, возникающие и развивающиеся с внутренней поверхности, постепенно увеличиваются (по глубине и протяженности) с увеличением числа теплосмен. Причиной их появления и роста являются также растягивающие напряжения, возникающие от торможения усадки чугуна во время быстрого охлаждения внутренней поверхности после извлечения слитка из изложницы.

Причиной образования трещин третьего рода считают циклически повторяющиеся нагрев и охлаждение чугуна с внутренней стороны стенки, вызывающие неравномерную пластическую деформацию отдельных зерен.

Совершенно очевидно, что описанные выше процессы осложняются физико-химическими процессами и прежде всего окислением поверхности трещин.

Возможность появления всех указанных выше трещин определяют условия работы изложницы. Распределение температуры по толщине ее стенки в различные периоды формирования слитка показано на рис. III. Неравномерность и цикличность нагрева и охлаждения отдельных участков изложницы являются причиной развития термических напряжений, которые и вызывают появление трещин. Все другие факторы влияют только на скорость их развития. К числу таких факторов следует отнести

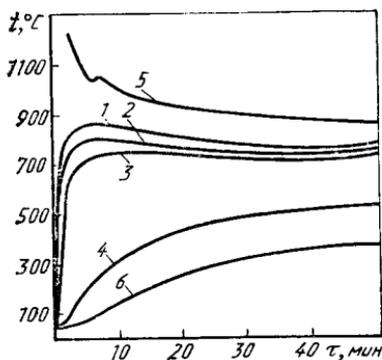


Рис. 111. Изменение температуры стенки изложницы для слитка массой 12,8 т:

1, 2, 3, 4, 5 — соответственно на глубине 2, 10, 20, 100 и 200 мм; 6 — поверхность слитка

наличие несплошностей, изменение фазового и химического состава при циклических нагревах, рост чугуна, механическое воздействие заливаемой стали и т. д.

В предыдущих главах было показано, что величина термических напряжений в отливке (изложнице) зависит от перепада тем-

ператур (Δt) между отдельными ее частями или по сечению стенки, коэффициента термического сжатия (α), модуля упругости (E). Способность же выдерживать эти напряжения без разрушения характеризуется прочностью материала. Исходя из изложенного, способность материала выдерживать возникающие напряжения — стойкость против образования трещин B — должна быть прямо пропорциональна временному сопротивлению σ_v и обратно пропорциональна α , E , Δt . Отметим, что перепад температур определяется теплопроводностью материала λ , и чем выше λ , тем меньше разность температур разных частей (сечений) изложницы. Нельзя исключать возможность релаксации возникающих напряжений за счет работы пластической деформации. Повышенную пластичность δ сплава следует рассматривать как фактор, снижающий вероятность образования трещин. Следовательно, в общем виде функциональная зависимость стойкости материала против образования трещин

$$B = f [(\sigma_v \lambda \delta) / (E \alpha)].$$

Соответствующие характеристики материала следует учитывать именно в той температурной области, которая соответствует реальным условиям службы изложницы. Недооценка этого обстоятельства, т. е. суждение о стойкости материалов на основе сопоставления их характеристик при нормальной температуре, часто приводит к ошибочным выводам.

Определенные погрешности вносит также недоучет степени и полноты фазовых превращений и изменения структуры при циклическом нагреве и охлаждении.

Следует подчеркнуть, что уделять особое внимание какой-либо одной или группе перечисленных выше характеристик необходимо с учетом условий эксплуатации и конструкции изложницы.

Главными показателями, определяющими стойкость материала изложницы, являются структура чугуна и его фазовый состав. Именно они влияют на E , σ_v , δ , λ , α . Наиболее доступные пути регулирования структуры — изменение химического состава и скорости охлаждения чугуна в форме.

По данным многочисленных исследований, степень эвтектичности чугуна для изложниц рекомендуется принимать близкой к единице (0,97—1,05). Достигать этих значений следует главным образом увеличением содержания углерода, не повышая концентрацию кремния более 2 %, ибо кремний, растворяясь в феррите, снижает теплопроводность чугуна и повышает его хрупкость. Концентрацию углерода и кремния в чугуне рекомендуется поддерживать соответственно в пределах 3,4—4,2 и 1,4—2,2 %. В чугунах для изложниц массой более 3 т содержание углерода целесообразно поддерживать на верхнем, а кремний на нижнем пределе.

В отношении оптимальной концентрации марганца нет единого мнения. Следует отметить, что марганец стабилизирует перлит, упрочняет металлическую матрицу, в определенной мере нейтрализует серу. Опыт ряда металлургических заводов свидетельствует о положительном влиянии марганца (до 0,75 %) на стойкость изложниц. Фосфор и сера являются нежелательными примесями, поэтому их концентрация должна быть минимальной.

Влияние других легирующих элементов (Cr, Ni, Mo, V и др.) следует оценивать по их воздействию на структуру, степень графитизации, форму графита.

Выбирая состав и структуру чугуна не следует забывать, что необходимо стремиться к оптимальному сочетанию теплопроводности, пластических и прочностных свойств сплава. Изложницы из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом характеризуются более высокой по сравнению с серым чугуном (в 1,5—2 раза) стойкостью при производстве мелких и средних слитков. Однако стойкость изложниц из чугуна с пластинчатым графитом для крупных слитков (массой более 50 т) мало отличается от стойкости таких же изложниц из чугуна с шаровидным графитом.

Более перспективным материалом для изложниц, очевидно, является чугун с вермикулярным графитом. Особенностью этого материала является его более высокая (в 1,5 раза) теплопроводность по сравнению с чугуном, имеющим шаровидный графит. В то же время модуль упругости его значительно ниже.

Макро- и микроструктура чугуна, как было показано в гл. 9, кроме состава сплава определяется еще и условиями охлаждения.

В настоящее время на практике регулирование режима охлаждения ограничено применением кокилей, полупостоянных и разовых песчаных форм. Наибольшую стойкость имеют изложницы, полученные в разовых песчаных формах, поскольку в них формируется отливка с наибольшей степенью графитизации чугуна (ферритно-перлитная матрица) и минимальными остаточными напряжениями.

Особенности технологии изготовления изложниц. Условия службы изложниц, в отличие от различных чугуновых отливок, определяют особенности технологии их производства.

Прежде всего следует отметить, что наиболее целесообразным в технико-экономическом отношении является использование чу-

гуна первой плавки, т. е. без последующего переплава в вагранках или других печах. Это, как правило, расплав с низким содержанием серы и фосфора, однако в нем повышено содержание углерода (до 4,7 %), который выделяется в виде спели, его температура чрезмерно высока и состав непостоянен. Все это вызывает необходимость дополнительной обработки расплава в ковшах (чугуновозах) или в специальных печах-отстойниках. Основным недостатком этого способа является большая продолжительность отстоя (3,5—4 ч) и, следовательно, потребность в большом количестве промежуточных агрегатов.

Наиболее прогрессивным способом является продувка чугуна инертными газами (N, Ar), позволяющая интенсифицировать спелевыделение, усреднить состав, введением охлаждающих добавок сократить время охлаждения до заданной температуры заливки в формы. В практике отечественного производства имеется опыт изготовления изложниц как из пердельных, так и из смеси пердельного и литейного чугунов.

Особенности выплавки чугуна для изложниц в вагранках вызваны необходимостью получения высокого содержания углерода, что достигается увеличением высоты горна. Не допускается высокий перегрев расплава (не выше 1300 °С на желобе), использование стального скрапа в завалке. Таким образом, приемы, применяемые для повышения свойств машиностроительных отливок, вызывающие увеличение количества связанного углерода, измсльчение графита, в данном случае неприемлемы. Повышение температуры заливки свыше 1200 °С приводит не только к отрицательному влиянию на структуру, но и к ухудшению поверхности изложниц, увеличению литейных напряжений и появлению рыхлот. Заливку форм осуществляют из поворотных или стопорных ковшей через различные литниковые системы (сифонные, дождевые, на нескольких уровнях). Тип системы определяется прежде всего массой изложницы и ее конструкцией.

Из всех видов форм, используемых для отливки изложниц, наиболее распространены разовые песчаные формы, обеспечивающие высокое качество изложниц. Процесс изготовления таких форм максимально поддается механизации и автоматизации.

В зависимости от условий производства и конструкции изложницы распространение получили два способа изготовления форм: по чистой модели и раздельной оснастке. Формовочная смесь имеет следующий состав, %: 60—80 отработанной смеси, 5—20 кварцевого песка, 5—20 глины, иногда 10 опилок. На поверхности полости литейной формы и стержня в два-три приема наносят графитосодержащие покрытия. После сборки формы подсушивают при 350 °С в течение 1—2 ч.

Залитые чугуном формы охлаждаются до выбивки в зависимости от массы изложницы в течение 24—100 ч. При ранней выбивке (при температуре 600—700 °С) стойкость изложниц снижается из-за высоких напряжений.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Аэратор 83

Б

Бегуны 82—83

Био критерий 23

В

Вагранка 172—174

Венты 63

Воронка литниковая 106

Выбиваемость 68

Выпор 44, 107

Вязкость динамическая 10

— циклическая 139

Г

Газопроницаемость 68

Галтель 133

Гиббса энергия 15, 17, 27

Гигроскопичность 68

Глины 71—73

Графит:

влияние на свойства чугуна 136,
138—139

классификация 136

рост включений 143—144

Д

Дарси закон 45

Дендрит 31, 34

Дефекты экзогенные 43—44

— эндогенные 43

Дуплекс-процесс 181

Ж

Жеребейка 105

Жидкогекучность 154—155, 186—187

З

Закалка 153—154

Затвердевание направленное 108

К

Каналы вентиляционные 65

Карта технологическая 134

Кластер 12, 28

Ковши литейные 116—118

Коллектор 107

Комплект модельно-опочной оснастки
54

— модельный 54—56

Контроль отливок 129—130

Коэффициент аккумуляции теплоты 25

— газопроницаемости 45

— диффузии 10

— термического сжатия 36

— удельного газовыделения 44

Кристаллизация 23, 27

Л

Легирование ковшовое 150

— поверхностное 53

Лигатура 8

Ликвация:

макроликвация 40

микроликвация 39

обратная 42

прямая 41

Линии формовочные автоматические
100—102

М

Мастер-модель 60

Материалы огнеупорные:

состав 16

огнеупорность 17

химическая стойкость 17

Машины прессовые 89—92

— вакуумные 96—97

— встряхивающие 92

— импульсные 95

— пескодувные 93—94

— пескострельные 94—95

— со штифтовым подъемом опок 97

— с перекидным столом 98—100

— специальные 97

— с поворотным столом 98
— с протяжкой модели 97—98
Металл гетерогенный 28
— гомогенный 27
Миксер 22
Модификаторы 34—36
Модифицирование 22, 152, 213

Н

Нормализация 153—154

О

Оси дендрита 34
Осыпаемость 67
Отбел 144, 146, 152—153, 158, 244—
245
Отжиг графитизирующий 153
Отпуск 154

П

Переохлаждение концентрационное 34
— расплава 27—30, 33
Пески 68—71
Пескометы 93
Печь индукционная канальная 182
— — тигельная 180
Питатель 107, 108
Пластичность 67
Плита вентиляционная 65—66
— модельная 59
— — координатная 56—57
— подопочная 65
— сушильная 65
Податливость 67
Подложка 28, 29
Пористость газовая 15, 16, 43, 45, 46
— усадочная 37—39
Прибыль 5, 38, 107, 113—115
Пригар механический 52, 76
— термический 52
— химический 52, 68, 76
Припуск 133
Пробки вентиляционные 63
Промодель 60
Прочность смеси 67

Р

Размер приведенный 25
Разъем формы 132
Раковина газовая 43, 45—46
— усадочная 37
Раскисление 21
Расплав 7
Рафинирование 20, 209
Решетки выбивные 122—123

С

Связующее 73—76
Сиверта закон 20
Скорость возникновения зародышей 28
— линейная роста 28
Смесь наполнительная 79
— облицовочная 78—79
— отработанная 66, 69, 82
Состояние метастабильное 28
Сродство к кислороду 15
Стояк 106

Т

Текучесть 68
Температура заливки 120—121
— кипения металла 9, 10
— начала линейной усадки 47
— плавления металла 8—9
— распределения равновесия 42
Теплота плавления металла 9, 11

У

Углеродный эквивалент 146
Узел термический 133
Уклон конструктивный 133
— формовочный 56, 58, 133
Усадка линейная 10, 47, 155, 189, 192
— литейная 48, 190
— объемная 10, 36—38, 188, 191
Устойчивость термохимическая 68
Устройства заливочно-дозировочные
118—120

Ф

Фиксатор стержневой 56
Фильтры керамические 210
Флюс 19, 209, 212, 216
Формовка 85
Фурье закон 24

Ч

Часть знаковая 5, 56

Ш

Шаблон 66, 88
Шихта 18, 171—172
Шлак:
образование 18, 177—178
схема движения 108
Шлакоуловитель:
назначение 106
расчет площади поперечного сечения
112—113
Штырь направляющий 59
— центрирующий 59

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение (А. М. Михайлов)	3
<i>Раздел I. Теоретические основы литейных процессов</i>	7
Глава 1. Основы приготовления литейных сплавов (М. В. Пикунов, Л. И. Леви)	7
§ 1. Физические свойства металлов и сплавов	7
§ 2. Взаимодействие металлических расплавов с газами	12
§ 3. Взаимодействие металлических расплавов с огнеупорными материалами	16
§ 4. Основы технологии плавки	18
Глава 2. Затвердевание и охлаждение отливок (В. П. Соловьев, И. Б. Куманин)	23
✓ § 1. Затвердевание отливок	23
✓ § 2. Условия кристаллизации сплавов при затвердевании отливок	27
§ 3. Формирование кристаллической структуры сплавов отливок	31
§ 4. Усадка сплавов, формирование усадочных раковин и пор в отливках	36
✓ § 5. Развитие ликвации в сплавах при затвердевании отливок	39
§ 6. Газовые дефекты в отливках. Газообмен между отливкой и формой	43
§ 7. Линейная усадка сплавов. Напряжения в отливках	47
§ 8. Формирование поверхности отливок	51
<i>Раздел II. Технологические основы литейного производства</i>	54
Глава 3. Модельное производство (Б. Н. Благов)	54
§ 1. Модели и модельные плиты	55
§ 2. Стержневые ящики	61
§ 3. Опоки	63
§ 4. Прочий инструмент и приспособления	65
Глава 4. Формовочные материалы (Б. В. Бауман, Н. Т. Исаханян)	66
§ 1. Исходные формовочные материалы	68
§ 2. Формовочные и стержневые смеси, противопопригарные покрытия	77
Глава 5. Изготовление форм и стержней (Л. Я. Козлов)	85
§ 1. Ручная формовка	85
§ 2. Машинная формовка	88
§ 3. Особенности изготовления стержней	102
§ 4. Сушка, подсушка и химическое твердение форм и стержней	103
§ 5. Сборка форм	104
	255

Глава 6. Литниково-питающие системы (Б. В. Бауман)	106
§ 1. Классификация литниковых систем	109
§ 2. Расчет литниковых систем	110
§ 3. Прибыли	113
Глава 7. Заливка форм. Охлаждение, выбивка и очистка отливок (Э. Б. Тен, А. В. Курдюмов)	115
§ 1. Заливка форм	115
§ 2. Охлаждение отливок и выбивка их из форм	121
§ 3. Обрубка, очистка и термическая обработка отливок	124
§ 4. Дефекты отливок и их исправление	128
Глава 8. Проектирование технологии изготовления отливок (Б. И. Бла- гов)	131
Раздел III. Производство отливок из различных сплавов	135
Глава 9. Чугунные отливки (Я. Г. Клецкин, Г. И. Клецкин, А. М. Ми- хайлов)	135
§ 1. Структура и механические свойства чугуна	136
§ 2. Процессы формирования литой структуры	139
§ 3. Влияние различных факторов на структуру, механические и литейные свойства чугуна	145
§ 4. Отливки из серого чугуна	156
§ 5. Отливки из ковкого чугуна	159
§ 6. Отливки из высокопрочного чугуна	163
§ 7. Отливки из чугуна с вермикулярным графитом	168
§ 8. Отливки из белого и отбеленного чугунов	170
§ 9. Приготовление чугуна	171
Глава 10. Стальные отливки (А. М. Михайлов)	183
§ 1. Классификация стальных отливок	183
§ 2. Отливки из нелегированной (углеродистой) стали	185
§ 3. Отливки из легированной стали	193
§ 4. Отливки из хладостойкой стали	205
Глава 11. Отливки из цветных сплавов (А. В. Курдюмов, Л. Я. Коз- лов)	207
§ 1. Отливки из алюминиевых сплавов	207
§ 2. Отливки из магниевых сплавов	211
§ 3. Отливки из медных сплавов	214
§ 4. Отливки из никелевых сплавов	217
§ 5. Отливки из кобальтовых сплавов	219
§ 6. Отливки из тугоплавких сплавов	220
Глава 12. Специальные способы литья (Э. Б. Тен, Я. И. Шкленник)	223
§ 1. Литье в оболочковые формы	224
§ 2. Литье по выплавляемым моделям	227
§ 3. Литье в кокиль	231
§ 4. Литье под давлением	233
§ 5. Центробежное литье	236
§ 6. Непрерывное и полунепрерывное литье	239
§ 7. Электрошлаковое литье	241
Глава 13. Отливки для металлургического оборудования (А. М. Ми- хайлов)	242
§ 1. Прокатные валки	242
§ 2. Производство изложниц	249
Предметный указатель	253